

Diplomová práce

**Testování mechanických vlastností lepených spojů Al slitin s pomocí
metody DIC**

**Testing of mechanical properties of bonded aluminium alloys joints
using DIC metod**

Autor: Bc. Pavel Hančík

Ostrava 2021

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Pavel Hančík

Studijní program: N0715A270004 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma: Testování mechanických vlastností lepených spojů Al slitin s pomocí metody DIC
Testing of mechanical properties of bonded aluminium alloys joints using DIC method

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor.
2. Mechanické vlastnosti a zkoušení lepených spojů Al slitin.
3. Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC.
4. Vyhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ZHENG, Guojun, Chao LIU, Xiao HAN a Weidong LI. Effect of spew fillet on adhesively bonded single lap joints with CFRP and aluminum-alloy immersed in distilled water. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2020, 16.3.2020, 2020(99), 9 [cit. 2020-09-30].
- [2] RAMASWAMY, Karthik, Ronan M.O'HIGGINS, Ajay KUMAR KADIYALA, Michael A. MCCARTHY a Conor T.MCCARTHY. Evaluation of grit-blasting as a pre-treatment for carbon-fibre thermoplastic composite to aluminium bonded joints tested at static and dynamic loading rates. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2020, 13.1.2020, 2020(185), 12 [cit. 2020-09-30].
- [3] ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. *Image processing, analysis, and machine vision*. 4th edition. United States of America: Cengage Learning, 2015. International Edition. ISBN 978-1-133-59369-0.
- [4] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [5] POCHMON, Michal. *Optické měřicí 3D metody*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3072-0.
- [6] LIČEV, Lačezar. *Analýza, modelování, rozpoznávání a vizualizace procesu měření objektů na snímcích*. [Brno]: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-3296-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Filip Huvar**

Datum zadání: 30.11.2020

Datum odevzdání: 23.04.2021

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá laserovými technologiemi předúpravy povrchu lepených ploch u hliníkových slitin a popisu dějů probíhajících v průběhu tahové zkoušky. V první části se tato práce zabývá teoriemi o vzniku adhezních sil v lepeném spoji a předúpravám povrchu lepených ploch u hliníkových slitin. Druhá část pojednává o zkouškách mechanických vlastností lepeného spoje a metodách měření posuvu s důrazem na metodu digitální korelace obrazu (DIC). Třetí část se zabývá návrhem a realizací samotného experimentu včetně tahové zkoušky s podporou DIC metody. V poslední části je vyhodnocení výsledků a přínosy celého experimentu.

Klíčová slova

Lepený spoj, DIC (digital image correlation), laserové gravírování, laserové čištění, vakuum

Abstract

This diploma thesis deals with increasing the mechanical properties of the glued joint in aluminium alloys by pre-treatment the surface of the glued joint with laser technology and a description of the processes taking place in the tensile test. In the first part, this work deals with theories about the formation of adhesive forces in the glued joint and surface pre-treatment of glued surfaces of aluminium alloys. The second part deals with tests of mechanical properties of glued joints and methods of measuring displacement with emphasis on the method of digital image correlation (DIC). The third part with a rounded design and implementation of individual experiments, including tensile tests with the support of DIC methods. The last part is an evaluation of the results and benefits of the whole experiment.

Key Words

Glued joint, DIC (digital image correlation), laser engraving, laser cleaning, vacuum



Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Filipu Huvarovi za cenné rady při vypracovávání teoretické, tak praktické části. Dále děkuji paní doc. Ing. Petře Váňové Ph.D. za vždy vstřícný přístup a zajištění metalografických výbrusů. Děkuji paní Romaně Raškové a celé firmě Makoprint za zhotovení vygravírovaných zámků.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu ve všem, co dělám.



Obsah

Úvod	- 1 -
1. Teoretický rozbor	- 2 -
1.1 Teorie lepeného spoje	- 2 -
1.1.1 Teorie mechanické adheze	- 2 -
1.1.2 Teorie chemické adheze	- 3 -
1.1.3 Elektrostatické teorie	- 5 -
1.1.4 Teorie difúze	- 6 -
1.1.5 Teorie adsorpce	- 6 -
1.2 Předúprava povrchu lepených ploch	- 8 -
1.2.1 Odmaštění	- 8 -
1.2.2 Piklování v kyselině chromsírové	- 8 -
1.2.3 Eloxování v kyselině chromové	- 9 -
1.2.4 Eloxování v kyselině sírové	- 10 -
1.2.5 Laserové čištění	- 10 -
1.2.6 Úprava povrchu plazmou	- 13 -
1.3 Konstrukce lepených spojů	- 18 -
1.3.1 Překlátované spoje	- 19 -
2 Mechanické vlastnosti a zkoušení lepených spojů Al slitin	- 21 -
2.1 Destruktivní zkoušky mechanických vlastností	- 21 -
2.1.1 Zkouška lepených spojů ve smyku	- 22 -
2.1.2 Zkouška pevnosti lepených spojů v odlupování podle Wintera	- 23 -
2.1.3 Zkouška lámavosti lepených spojů	- 24 -
2.1.4 Zkouška rázové pevnosti	- 24 -
2.1.5 Zkouška pevnosti ve smyku při statickém namáhání	- 25 -



2.2 Metody měření posuvů	- 25 -
2.2.1 Tenzometry.....	- 25 -
2.2.2 Video extenzometr	- 26 -
2.2.3 DIC metoda	- 27 -
3.Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC.....	- 34 -
3.1. Návrh experimentu	- 34 -
3.1.1 Použitá slitina a lepidlo při experimentu.....	- 34 -
3.1.2 Gravírování.....	- 36 -
3.1.3 Návrh gravírovaných zámků	- 41 -
3.1.4 Konstrukce přípravku pro lepení.....	- 44 -
3.2 Realizace experimentu	- 47 -
3.2.1. Příprava vzorků pro tahovou zkoušku.....	- 49 -
3.2.2 Příprava vzorků pro tahovou zkoušku s použitím vakua	- 51 -
3.2.3 Porovnání přitlačných sil.....	- 52 -
3.3 Průběh měření	- 54 -
3.3.1 Nastavení měřících přístrojů při trhací zkoušce.....	- 55 -
4.Vyhodnocení a závěr	- 57 -
4.1 Vyhodnocení vygravírovaných zámků typu A	- 57 -
4.2 Vyhodnocení vygravírovaných zámků typu B	- 64 -
4.3 Vyhodnocení skupiny C čištěné gravírovacím laserem.....	- 69 -
4.3.1 Digitální korelace obrazu u skupiny C1 a C2	- 74 -
4.4 Vyhodnocení skupiny D čištěné pomocí průmyslového laseru.....	- 77 -
4.4.1 Digitální korelace obrazu skupiny u D1 a D2	- 82 -
4.5 Závěr	- 85 -
Zdroje	- 90 -

Úvod

V dnešní době, kdy se automobilový průmysl snaží snížit emise svých vozů s cílem splnit stále přísnější zákonné limity emisí. Vynakládají velké finanční prostředky pro zefektivňování procesu spalování u klasických motorů, dále se zavádí hybridní či plně elektrické systémy motorů. Další cestou je také snížení hmotnosti automobilu, které vede ke snížení spotřeby a emisí. Vhodnou náhradou za současné ocelové materiály jsou hliníkové slitiny. Hliníkové slitiny disponují poměrně nízkou hustotou a zároveň dosahují velmi dobrých mechanických vlastností právě vhodných pro konstrukci automobilu. Při nahrazení ocelových materiálů hliníkovými slitinami lze ušetřit až 46% hmotnosti vozu bez ztráty mechanických vlastností karoserie. Nicméně spojování dílů z hliníkových slitin je mnohem obtížnější než u ocelových konstrukcí. Svařování těchto slitin je technologicky náročnější než u oceli díky velké afinitě hliníku ke kyslíku a je nutné používat ochranné atmosféry, a proto vhodnými technologiemi pro svařování jsou TIG, MIG, které jsou finančně náročné a jejich automatizace složitá. To je důvodem pro zavádění méně finančně náročných metod spojování a jednou z perspektivních metod se jeví spojování dílů hliníkových slitin lepením.

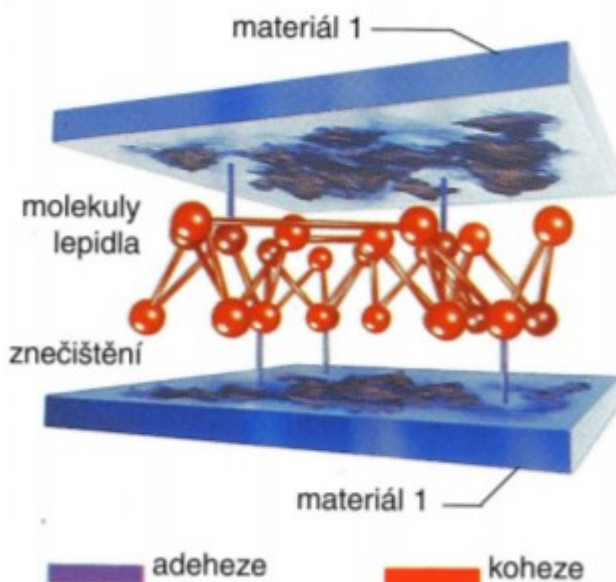
Lepené spoje disponují mnoha pozitivními vlastnostmi, jako jsou tlumení vibrací, těsnění, absorpce energie a rovnoměrné zatížení spoje. Ovšem dokonalé provedení lepeného spoje vyžaduje poměrně složitou předúpravu povrchu před vlastním lepením. Díky výzkumu v této oblasti byly nalezeny technologie, které dokáží povrch před lepením rychle a efektivně upravit. Mezi tyto technologie patří laserová a plazmatická úprava povrchu. Tyto technologie jsou nejen ekologické, ale také dosahují lepších výsledků než konvenční metody předúpravy. Pro hliníkové slitiny se jeví nejvhodnější laserová úprava povrchu.

Pro vyhodnocování lepených spojů je dnešním trendem technologie digitální korelace obrazu, která disponuje mnoha výhodami, jako je bezkontaktní měření deformace, ale také měření celé plochy lepeného spoje v průběhu zkoušky.

1. Teoretický rozbor

1.1 Teorie lepeného spoje

Lepený spoj a jeho pevnost závisí na dvou hlavních faktorech: adheze a koheze. Adhezi rozumíme přilnutí lepidla k adhezivu (lepené součásti). Pokud by adheze byla nízká, lepidlo nedostatečně přilne k povrchu a dojde k rozlepení spoje na rozhraní lepidlo – součást. Druhým zmiňovaným faktorem je koheze, tou rozumíme samotnou vlastní pevnost lepidla po ztuhnutí, či vytvrzení. Je-li adheze a samotná pevnost materiálů vyšší, než koheze dojde k porušení spoje na rozhraní lepidlo – lepidlo. Kohezní pevnost ovlivňuje samotný charakter lepidla, u dvousložkových lepidel můžeme očekávat vysokou kohezi, zatímco u jednosložkových lepidel je kohezní pevnost zpravidla nižší. Vznik adhezivních sil je popsán mnoha teoriemi, které si blíže popíšeme. Rozdíl mezi adhezí a kohezí lepeného spoje vidíme na obr. 1.[1]

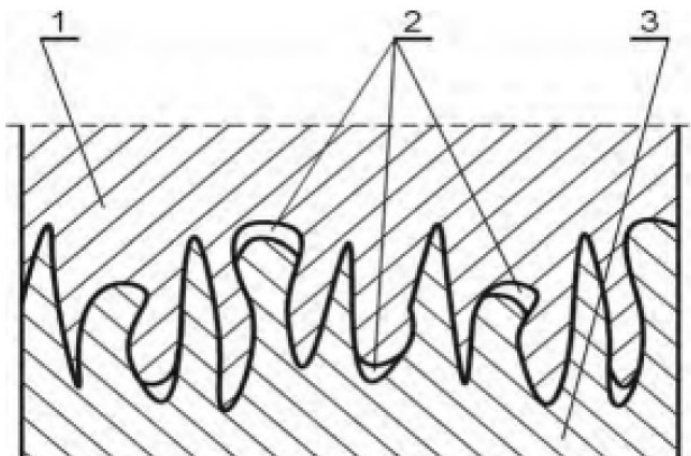


Obr. 1 Grafické zobrazení adheze a koheze. Převzato z [2].

1.1.1 Teorie mechanické adheze

Jedná se o jednu z prvních teorií o vzniku adhezivních sil. Tato teorie vzniku adheze se vysvětluje tak, že lepidlo zateče do pórů a dutin lepeného materiálu a po vytvrzení lepidla dojde ke vzniku mechanicky prolutého systému, jako vidíme na obr. 2. Z této teorie vyplývalo, že pro dosažení vysoké adheze, je zapotřebí mít lepené plochy dostatečně zdrsňené. Nicméně toto tvrzení bylo brzy vyvráceno dosažením vysoké pevnosti u spojů na hladkých plochách.

Navíc tato teorie je nedostatečná k vysvětlení adheze u neporézních materiálů, jako je sklo nebo kov. [1]



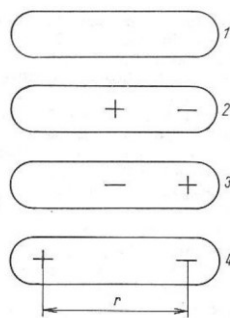
Obr. 2 Mechanická adheze 1- lepidlo 2 -zachycený vzduch 3 – lepená součást.

Převzato z [3]

1.1.2 Teorie chemické adheze

Víme, že v molekule jsou atomy prvků spojeny pevnými chemickými vazbami, tyto vazby označujeme jako primární. Primární vazby známe ve třech různých podobách: kovalentní, iontové a kovové. Nicméně mezi molekulami existují další přitažlivé síly a to: Vodíkové můstky, Van der Waalsovy síly, které dále dělíme na elektrostatické Keesomovy síly, indukční Debyeovy síly a Londonovy disperzivní síly. Tyto síly označujeme jako sekundární. Vznik specifické adheze mezi adhezivem (lepidlem) a adherentem (lepeným povrchem) je závislý na dvou na sebe navazujících fázích. První podmínkou je absolutní kontakt molekul lepených ploch s molekulami lepidla. Druhou podmínkou je adsorpce lepidla lepeným povrchem, to znamená zachycení molekul adheziva sekundárními přitažlivými silami.[1],[4]

- ➔ Keesomovy elektrostatické síly vznikají působením dvou permanentních dipólů. Tyto dipóly vznikají asymetrickým rozdělením elektrických nábojů v molekule. Samotná síla vzniká tak, že se přitahují dva opačně nabitě dipóly dvou molekul. Pomocí tohoto charakteru můžeme rozdělit molekuly na nepolární, negativně polární, pozitivně polární a negativně i pozitivně polární viz obr. 3.



Obr. 3 Vysvětlení různé polarity látek 1- nepolární 2- negativně polární 3- pozitivně polární 4- pozitivně i negativně polární r – vzdálenost jader. Převzato z [1]

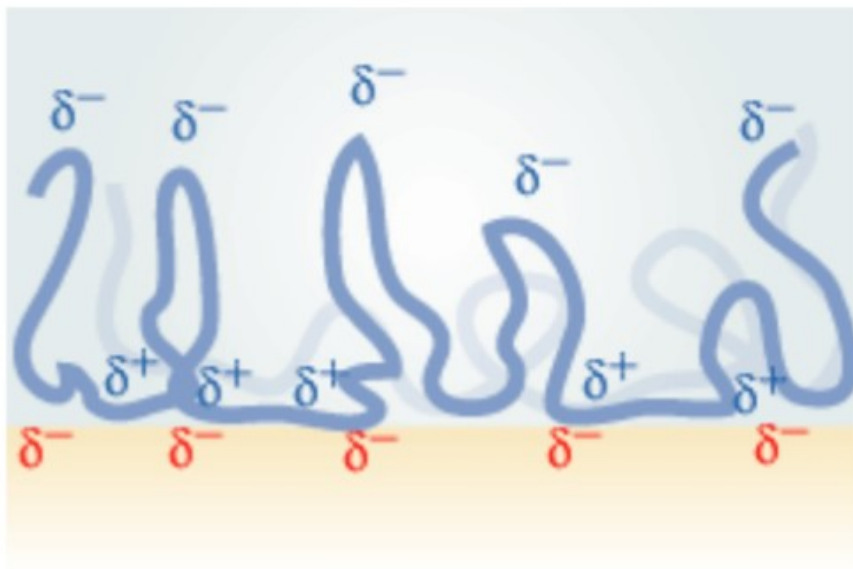
- ➔ Indukční síly Debyeovy nejsou z hlediska lepení podstatné. Jejich vznik je podmíněn působením permanentního dipólu na molekulu, která díky indukci zpolarizuje a dojde ke vzniku přitažlivé síly.
- ➔ Londonovy disperzivní síly naopak jsou velmi důležité pro vznik specifické adheze a podílí se na pevnosti lepeného spoje. Tyto síly jsou velmi závislé na teplotě a jsou vyvolány vzájemnou polarizací molekul.
- ➔ Vodíkové můstky tvoří poslední důležitou součást při vzniku specifické adheze. Vodíkové můstky tvoří silnější vazby, než samotné Van der Waalsovy síly a vznikají jak mezi molekulami, tak uvnitř molekuly. Z toho vyplývá, že se podílejí jak na adhezi, tak na kohezi lepeného spoje. Vodíkové můstky jsou zvláštním případem působení dipólu, vytváří je zpravidla vodík, kovalentně vázaný na elektronegativních atomech. Energie všech zde vyjmenovaných vazeb vidíme v tab. 1. [1], [4]

Tab. 1 Energie chemických vazeb. Převzato z [4]

Typ vazby	Příklad vazby	Energie vazby [kJ/mol]
kovalentní	C–C	350
iont-iont	$K^+ - Cl^-$	450
Iont-dipól	$Na^+ - CF_3H$	33
Dipól-dipól	$CF_3H - CF_3H$	2
Londonovy disperzní síly	$CF_4 - CF_4$	2
Vodíkové můstky	$H_2O - H_2O$	24

1.1.3 Elektrostatické teorie

Experimentálně bylo zjištěno, že přilnavost filmu lepidla na kov nebo na vysokomolekulární plasty závisí na rychlosti odtrhování spoje. Dále bylo prokázáno vizuálně i elektrometricky, že při zvyšování rychlosti odtrhování ve vakuu vzniká emise elektronů mezi povrchy. Díky této studii se vyvinula teorie, že při blízkém kontaktu dvou různých plastů nebo plastu a kovu, dochází k přechodu elektronů mezi povrchy. Následně dochází k tomu, že jeden z povrchů se stane bohatší na elektrony a druhý chudší, což vede ke vzniku dvojvrstvy, která působí jako mikrokondenzátor, tento jev vidíme na obr. 4. To má za následek, že působí – li síla ve smyslu oddálení těchto ploch, zvětšuje se rozdíl potenciálů až do úplného roztrhnutí, kdy dojde k rovnováze těchto potenciálů. Závislost velikosti odporu proti působící síle k rychlosti odtrhování byla vysvětlena tak, že při pomalém odtrhování mohou elektrony pomalu odtékat, zatím co při vysoké rychlosti tomu je naopak. Ovšem i tato teorie má slabá místa, nepopisuje nenamáhanou trhlinu v lepeném spoji nebo vůbec nevysvětluje adhezi u nepolárních materiálů, které nejsou schopny tvořit elektrickou dvojvrstvu. [1], [4]



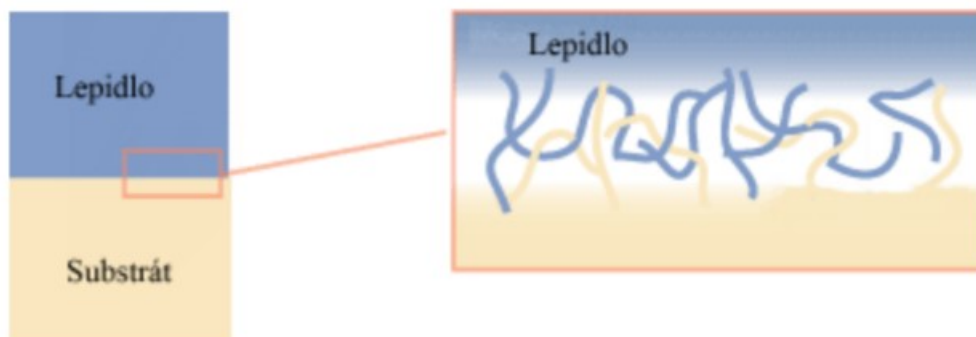
Obr. 4 Elektrostatická teorie. Převzato z [5]

1.1.4 Teorie difúze

Tato teorie vysvětluje adhezi mezi materiály na základě tak zvaného mikro-Brownova pohybu molekul. Tento pohyb umožňuje vzájemné prolínání molekul adhernetu a adheziva. Tato teorie má platnost za předpokladu, že polymerní látky v lepidle a lepené součásti jsou rozpustné a mísitelné, a že jejich molekuly disponují dostatečnou pohyblivostí, jako vidíme na obr. 5. Difuzi lepidla lze sledovat pod mikroskopem za použití fluorescenčních barviv. Ze sledování lze konstatovat tyto závěry: [1],[6]

- ➔ Rychlost difuze lze zvýšit vyšší teplotou
- ➔ Difuze malých molekul probíhá rychleji než velkých molekul
- ➔ Složité a rozvětvené molekuly difúzi brání a snižují adhezi lepeného spoje
- ➔ Existuje přímá úměra mezi účinností difúze a délkou jejího trvání
- ➔ Zvýšením tlaku zvětšíme plochu difuze a tím její účinnost [6]

Efekt difúzní teorie lze snadno u polymerních látek dokázat, použitím správného rozpouštědla nebo vysoké teploty na jejich povrchu, čímž vznikne změkklá lepivá vrstva. Dalším příkladem difúzní teorie je autoadheze polystyrenu, polymethylmetakrylátu, celulóidu a jiných termoplastů u kterých k jejich slepení stačí správné rozpouštědlo.[1]



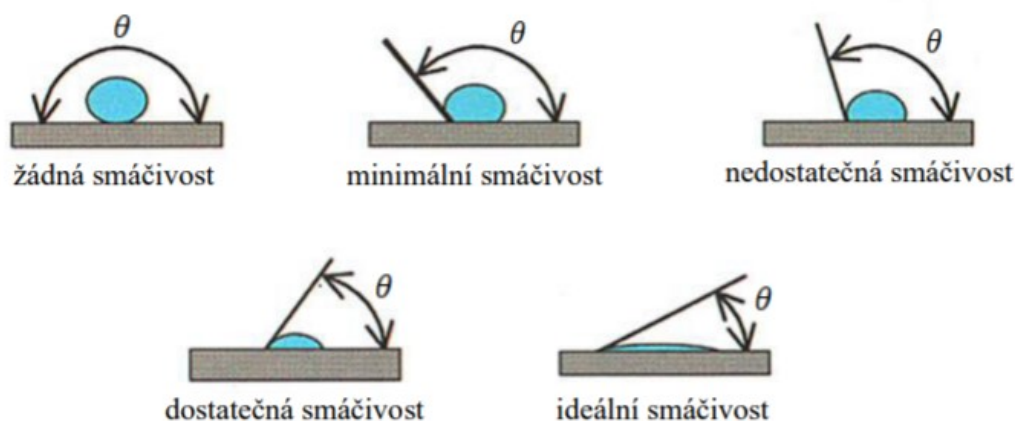
Obr. 5 Difúzní teorie. Převzato z [5]

1.1.5 Teorie adsorpce

Tato teorie vznikla v roce 1963 a vysvětluje adhezi na základě termodynamických úvah o smáčení pevného povrchu kapalinami. Předpokládá vznik mezifázového rozhraní na místě styku dvou různých fází. V tomto rozhraní se vyskytuje volná energie, která je výsledkem přitažlivých sil mezi molekulami na povrchu hmoty a sil uvnitř hmoty, které nejsou kompenzovány. U kapalin, které nejsou vystaveny přitažlivým silám na povrchu hmoty, dochází ke vzniku jakési blanky, která se snaží udržet kapalinu ve tvaru koule, což je tvar

Teoretický rozbor

s nejmenším povrchem k danému objemu. Nicméně při styku s pevnou látkou se tyto přitažlivé síly vyskytují, a proto dochází k různému stupni smáčení. Stupeň smáčení závisí na poměru povrchové energie podkladu (pevné látky) a součtu sbalujících sil kapaliny (lepidla). O úplném smáčení hovoříme tehdy, když přitažlivé síly povrchu adhernetu zcela převáží sbalující síly lepidla a dojde k rozprostření lepidla po povrchu. Z toho vyplývá, že má-li dojít ke smáčení, základní podmínce adheze, musí být povrchové napětí podkladu větší než povrchové napětí kapaliny. Graficky tyto jevy vidíme na obr. 6. [1],[8]



Obr. 6 Smáčivost. Převzato z [9]

Z toho vyplývá, že pokud lepidlo špatně smáčí povrch (adherent), nemůže dosáhnout dostatečně těsného vzájemného kontaktu potřebného pro vznik adherentních vazeb. Pro posouzení smáčivosti používáme kontaktní úhel θ . Pro tento úhel existuje tzv. Youngova rovnice:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lg}} \quad [6]$$

- ➔ γ_{sg} - povrchová energie pevné látky [J]
- ➔ γ_{ls} - mezifázová energie pevné látky a kapaliny [J]
- ➔ γ_{lg} -povrchová energie kapaliny [J] [6]

1.2 Předúprava povrchu lepených ploch

Z technologického hlediska musíme dbát na to, aby styčné plochy lepených materiálů byly co nejméně členité a neobsahovaly cizí nečistoty, které by negativně ovlivnily pevnost spoje. U hliníkových slitin musíme také dbát na to, aby na povrchu vznikaly oxidové vrstvy, které mají dobré adhezni vlastnosti ke zbytku slitiny.

1.2.1 Odmaštění

Hlavní povrchovou úpravou před lepením u hliníkových slitin je odmaštění, nejlépe v parách rozpouštědla nebo v alkalické lázni. Při absenci aparatury na odmaštění v parách rozpouštědla lze použít ponor, nicméně tento postup nedosahuje nejlepších výsledků. Pro odmašťování hliníkových slitin je nejvhodnější aceton, který dosahuje největších odmašťovacích schopností. V minulosti i dnes se používá odmaštění acetonem jako konečná povrchová úprava před lepením. V případě použití alkalické lázně využíváme odmaštění ponorem. Alkalické lázně bývají zpravidla zahřívány na 70° až 95 °C, abychom zvýšili jejich účinnost. Skládají se nejčastěji z alkalických solí jako jsou metakřemičitan sodný, tetraboritan sodný nebo pyrofosforečnan sodný. Lázně musí být dobře míchaný a daný povrch v této lázni máme po dobu 5 až 15 minut, následně použijeme oplach.[7],[8]

Mechanické zvýšení drsnosti u hliníkových slitin zpravidla není doporučováno z důvodu vysoké tvárnosti hliníkových slitin.[7]

1.2.2 Piklování v kyselině chromsírové.

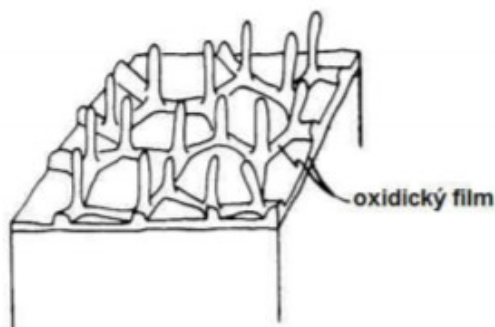
Piklování neboli moření v kyselině chromsírové probíhá v lázni o teplotě 60 °C po dobu 30 minut. Tato lázeň se skládá z:

- ➔ 178 ml koncertované kyseliny sírové
- ➔ 95,5 g čistého dvojchromanu draselného
- ➔ doplnění lázně vodou do objemu 1 litru

Lázně se musí neustále kontrolovat, zda-li jsou důležité složky v dostatečné koncentraci a stále promíchávány. Mořené součástky se musí po piklování urychleně opláchnout, nejprve studenou vodou a následně teplou vodou o teplotě maximálně 60 °C.

Po oplachu jsou součástky vloženy do většinou olověných van, kde se udržuje bezprašné prostředí a suší se o maximální teplotě 50°C. Piklovaný povrch nesmí přijít do kontaktu s holou rukou či jinou špínou nebo mastnotou. Lepení se doporučuje ihned po piklování nebo přistoupit

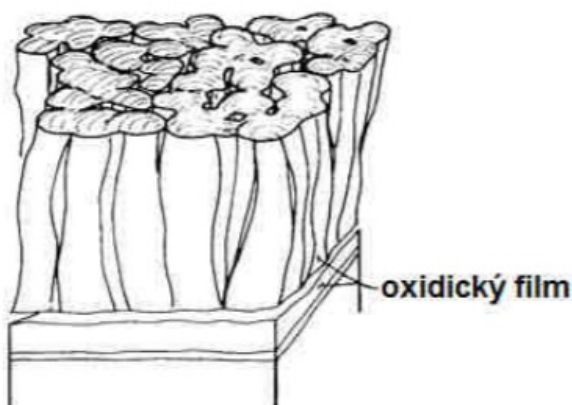
k jiné povrchové úpravě, která za stabilizuje povrchovou vrstvu. Schéma výsledného povrchu vidíme na obr. 7.[7]



Obr. 7 Schéma vrstvy po piklování. Převzato z [7]

1.2.3 Eloxování v kyselině chromové

Před touto úpravou povrchu je nutno zařadit piklování nebo alkalické odmaštění. Díky eloxování dosáhneme stabilní rovnoměrné vrstvy oxidů, která napomáhá zvýšení adheze lepení, tuto vrstvu vidíme obr. 8. Eloxované součásti jsou připojeny jako anoda a jako katody se využívají nerezové plechy. Elektrolytem je roztok o koncentraci 2 až 5 hmotnostních procent oxidu chromového ve vodě s kyselinou chromovou. U této lázně je nutné dbát na téměř žádný obsah chloridů a stálé míchání. V prvotní fázi eloxování je nutno zvýšit proud z 0 na 40 V v postupném sledu maximálně po 5 voltech v průběhu 10 minut. Následně zvedneme napětí na 50 V a zařadíme výdrž 5 minut. Teplota elektrolytu se musí pohybovat mezi 40-42°C. Ihned po eloxáži následuje studený a teplý oplach po dobu 5 minut a sušení v bezprašném prostředí po dobu 30 minut při teplotě maximálně 60°C. Po této operaci lze provést lepení.[7]



Obr. 8 Schéma oxidické vrstvy po eloxování v kyselině chromové. Převzato z [7]

1.2.4 Eloxování v kyselině sírové

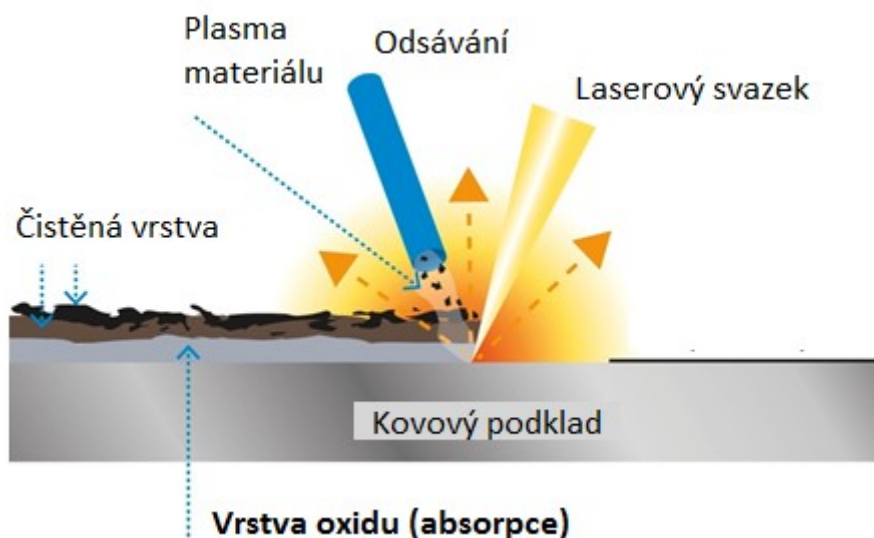
Při této eloxáži je nutné použít piklovací lázeň a po eloxování uzavřít póry pomocí horké destilované vody. Při použití hydroxidové alkalické lázně oproti piklovací, dochází k poklesu pevnosti v odlupování lepeného spoje až o 50 %. Eloxovací podmínky jsou:

- ➔ Koncentrovaná kyselina sírová 184 g/litr
- ➔ Teplota lázně 15 °C
- ➔ Proudová hustota 150 Am^{-2} (odpovídá napětí cca 19,5V) [6]

Eloxujeme po dobu 20 minut. Je nutno mít na paměti, že teplota a koncentrace kyseliny sírové ovlivňují vodivost lázně a je nutno brát zřetel na parametry lázně. Při dodržení těchto parametrů dosáhneme vrstvy oxidů o tloušťce 10 mikrometrů, které dostačují z korozivzdorného hlediska. Při prodloužení či nedodržení parametrů eloxování dochází ke vzniku tlustších nebo naopak tenčích vrstev, které negativně ovlivňují výsledné vlastnosti. Při tloušťce nad 12 mikrometrů prudce klesá pevnost v odlupování, zatímco při tloušťce pod 8 mikrometrů dostáváme nedostatečně chráněnou součást před korozi. Po úspěšném eloxování následuje důkladný oplach a následné ponoření součástí do horké vody na 20 minut. Po sušení v bezprašném prostředí musí dojít k okamžitému nanesení lepidla.[6]

1.2.5 Laserové čištění

Laserové čištění je v dnešní době novou, hojně používanou technologií na čištění povrchů. U hliníkových slitin jde hlavně o nečistoty či mastnoty na povrchu a přebytky oxidů. Laserová technologie oproti konvenčním metodám nevyužívá žádných obtížně zlikvidovatelných chemikálií, ani žádná brusiva, se kterými se musí řádně pracovat. Výhodou je také, že nepotřebuje žádné další suroviny ke svému provozu skladovat. Díky těmto faktům můžeme mluvit o laserovém čištění povrchu jako o ekologické variantě ke konvenčním způsobům. Pro tuto aplikaci jsou nejvhodnější volbou kovy, a to díky vysoké teplotě tání a vysoké odrazivosti povrchu. Pomocí laseru jsme schopni odstranit nežádoucí povlaky, nátěry nebo oxidy. Díky volitelné míře intenzity laseru můžeme odstraňovat celou hloubku nežádoucí vrstvy nebo jenom její nevyhovující část. To vše lze aplikovat při dodržení technologického postupu bez poškození či modifikace základního materiálu. Zatím je tato metoda hojně využívána pouze v leteckém průmyslu, nicméně je zde předpoklad dalšího rozšíření do automobilového průmyslu. Princip čištění vidíme na obr. 9. [10]



Obr. 9 Schéma čištění pomocí laseru. Převzato z [10]

Díky laserovému čištění jsme v některých případech schopni odstranit kombinace dvou a více vrstev na jednu operaci. Zatímco při použití konvenčního přístupu, bychom museli použít vícero metod k jejich odstranění. Díky schopnosti laseru odstraňovat z povrchu vrstvy oxidů jsme schopni vytvářet přímé kovové spoje s dlouhou životností. Laserové systémy jsou schopny pracovat v nepřetržitém provozu bez nutnosti technologických pauz a zbytečných oprav či prodlev ve výrobě. Jako vhodnou technologii pro čištění povrchu lepených ploch se stal laser u hliníkových a hořčíkových slitin. U těchto slitin lze dosáhnout rychlosti čištění v závislosti na parametrech až $35 \text{ cm}^2/\text{min}$. Laserové systémy mohou být zcela automatické nebo ruční pro malovýrobu.[10]

V roce 2016 výzkumný tým univerzity z Tongji, zkoumal vliv laserové předúpravy hliníkové slitiny na lepený spoj. Zkoumal neoptimálnější nastavení laserového paprsku na pevnost spoje. Jako testovací slitinu zvolili AA 6022-T4, chemické složení a mechanické vlastnosti vidíme v tab. 2. Jako lepidlo zvolili BETAMATE 1486, jednosložkové, tepelně vytvrditelné epoxidové lepidlo. Mechanické vlastnosti lepidla vidíme v tab. 3. [11]

Tab. 2 Chemické a mechanické vlastnosti slitiny AA6022-T4. Převzato z [11]

Chemické složení						Mechanické vlastnosti		
Slitina	Al [%]	Mg [%]	Si [%]	Ti [%]	Ostatní [%]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
AA6022-T4	96,63	0,6	1,1	0,12	1,55	131,1	220,6	25

Teoretický rozbor

Tab. 3 Mechanické vlastnosti lepidla BETAMATE 1486. Převzato z [11]

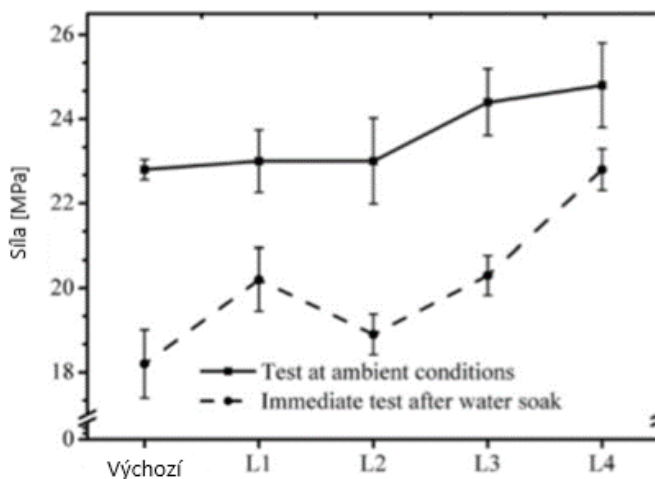
Lepidlo	Modul pružnosti [GPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
BETAMATE 1486	1,9	37,5	6,7

Vzorky měly rozměry 25,4 x 101,6 x 2 mm a lepený spoj byl jednoduše přeplátovaný s rozměry 12,7 x 25,4 x 0,25 mm. Vytvrzení vzorku probíhalo při 180 °C po dobu 20 minut. Následně byly vzorky rozděleny do skupin podle parametrů v tab. 4 a z každé skupiny byly vybrány vzorky, které byly ponořeny do vody o teplotě 54 °C po dobu 7 dní, aby se simulovalo prostředí bohaté na vlhkost a projevila se případná koroze. [11]

Tab. 4 Nastavení laserového zařízení. Převzato z [11]

Číslo skupiny	L1	L2	L3	L4
Frekvence [kHz]	400	200	100	10
Rychlost [mm/s]	10 000	5000	2500	250
Energetická hustota [J/cm ²]	0,4	1,4	4,09	19,01

Po vytažení byla provedena zkouška na smyk na trhačím stroji s rychlostí zatěžování 10 mm/min a vyhodnocovalo se vždy 5 vzorků na maximální zatížení vůči prodloužení. Výsledky zkoušky vidíme na obr. 10. [11]



Obr. 10 Výsledky zkoušky lepených spojů na smyk po laserové předúpravě povrchu. Převzato z [11]

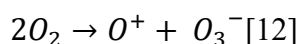
Výsledky zkoušky ukázaly, že pomocí laserové úpravy povrchu lze zvýšit pevnost lepeného spoje o 25 %. Jako nejefektivnější nastavení se ukázalo to s největší energetickou hustotou, u vzorku s nižší energetickou hustotou docházelo pouze k odmašťování povrchu, zatímco u vzorků L4 docházelo k odpařování oxidů hořčíku a nahrazení této vrstvy stabilní vrstvou oxidů hliníku. Díky tomuto jevu se zvýšila drsnost lepené plochy a tím se zvýšila adhezní schopnost. Následnou simulaci zvýšené vlhkosti působící na lepený spoj se také vzorky L4 s nejvyšší hustotou energetického toku, projeví jako nejlépe odolávající korozi, a to díky právě utvořené stabilní vrstvě oxidů hliníku. [11]

1.2.6 Úprava povrchu plazmou

Důležitým rozdílem z pohledu lepení je mezi kovovými materiály a plasty jejich povrchová energie. V kapitole o vzniku adheze v lepeném spoji jsme vysvětlili, že povrchová energie lepeného spoje je pro výslednou adhezi vysoce důležitá. Zatímco u plastů se setkáváme s nižší povrchovou energií, u kovů je to právě naopak, a proto je u plastů jejich smáčivost s lepidlem problematická. Nižší smáčivost lepidla způsobí nedokonalé rozprostření lepidla po povrchu spoje a dochází k nižší pevnosti. Pro úpravu povrchu plazmou je hlavním parametrem hustota toku iontů. Čím vyšší bude hustota toku, tím vyšší bude efektivita metody. Hustota toku je závislá na vícero parametrech jako jsou například metoda buzení plazmy, pracovní tlak plynu nebo velikost samotné aparatury. Nejužívanějším typem je úprava plazmou za atmosférického tlaku.[12]

Úpravy pomocí plazmatického výboje za atmosférického tlaku

Plazmatického výboje za atmosférického tlaku lze výhodně využívat při úpravě povrchu. Vytvoření plazmatu je podmíněno dvěma elektrodami, mezi kterými velmi rychle proudí plyn například vzduch a vysokým napětím několika kilovoltů mezi elektrodami. Takto vzniknutému výboji při atmosférickém tlaku říkáme koróna. Díky tomu vznikne rychlá řetězová reakce, pomocí které se začnou proudící molekuly mezi elektrodami měnit na ionty a následně pomocí elektrického pole je urychlen proud nabitých částic (elektronů a iontů). Příkladem této řetězové reakce v plazmatu je rozpad dvou molekul kyslíku na atomární kyslík a ozón. Tuto reakci lze zapsat:[12]



Ionty jsou vysoce nestabilní částice, a proto po dopadu na námi upravovaný polymerní povrch například polypropylen začnou ionty okamžitě reagovat s uhlíkem a vodíkem za vzniku OH^- a $C=O$. Tyto vzniklé produkty výrazně mění povrchové vlastnosti, zvyšují hydrofilitu

Teoretický rozbor

(smáčivost) a kladně se podepisují na budoucí adhezi lepeného spoje. Nicméně je nutno dávku plazmatu správně nastavit, aby nedocházelo k nechtěným reakcím nebo nedostatečné aktivaci povrchu. Tuto dávku plazmatu vypočítáme pomocí vztahu:[12]

$$D = \frac{P}{CB \cdot V} \quad [12]$$

- ➔ D – dávka plazmatu [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$]
- ➔ P – výkon aparatury [W]
- ➔ CB – šířka upravovaného povrchu [mm]
- ➔ V – rychlost posuvu trysky [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] [12]

Na účinnosti a velikosti aktivace námi upravovaném povrchu se podepisuje mnoho faktorů. Ten nejvýznamnější je samotný charakter upravovaného materiálu a jeho chemické složení, dále pak také elektrické parametry trysek. Dále pak na účinnost má vliv množství a rychlost protékajícího plynu a doba po kterou plazmatický výboj působí. Důležitým aspektem úpravy povrchu plazmou je, že ačkoliv modifikujeme povrchovou vrstvu materiálu, jeho objemové a vnitřní vlastnosti zůstanou beze změny. Ukázku plazmatického výboje vidíme na obr. 11. [12]



Obr. 11 Schéma aktivace povrchu pomocí plazmy. Převzato z [13]

Teoretický rozbor

V roce 2015 se výzkumný tým univerzity z Tongji se rozhodl zkoumat vliv plazmové předúpravy na lepený spoj hliníkové slitiny. Vycházel ze zjištěného faktu, že pevnost lepeného spoje nezávisí pouze na pevnosti lepidla, ale také na adhezní práci mezi lepidlem a adherentem. Pro tento výzkum použil dvě slitiny hliníku, jejichž chemické a mechanické vlastnosti vidíme v tab. 5 a lepidla jejichž vlastnosti vidíme v tab. 6.[14]

Tab. 5 Chemické složení a mechanické vlastnosti testovaných slitin. Převzato z [14]

Chemické složení						Mechanické vlastnosti		
Slitina	Mg [%]	Si [%]	S [%]	Ti [%]	Mn [%]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
X610-T4PD (X1.0)	0,63	0,82	0,01	0,05	0,12	119,9	228,6	21,9
X626-T4P (X0.9)	0,46	1,14	0,01	0,02	0,12	108,7	214,8	22,4

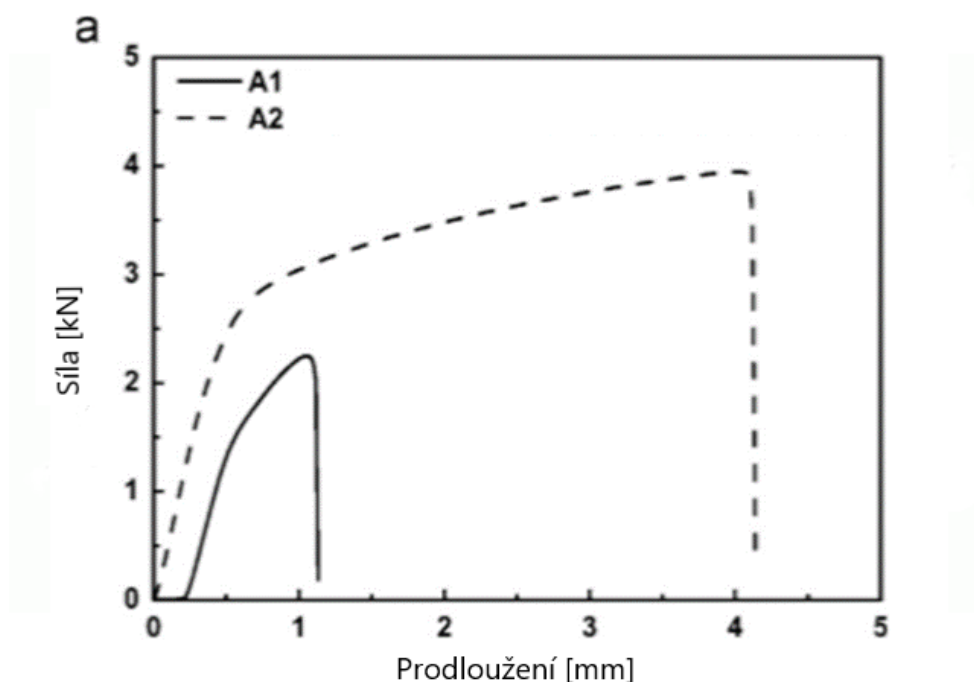
Tab. 6 Mechanické vlastnosti lepidla. Převzato z [14]

Lepidlo	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
A1	2,8	4,7	8,0
A2	3,7	8,9	28,6

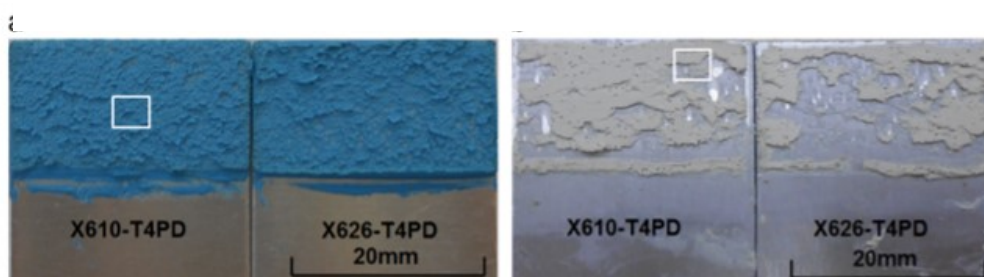
Lepidlo A1 je jednosložkové, tepelně vytvrditelné epoxidové lepidlo a A2 je dvousložkové, gumou vytvrzené, akrylické, modifikované epoxidové lepidlo.[14]

Testovací vzorky měly rozměry 25x100x0,9/1, spoj byl jednoduše přepřátovaný o rozměrech 12,5 x 25 x 0,25. Rychlost zatěžování byla 10 mm/min a vždy se testovalo 5 vzorků a vyhodnocovalo se maximální zatížení vzorku. Jako referenční skupina byly testovány vzorky bez plazmatické předúpravy, tyto vzorky byly pouze odmaštěny pomocí metylchloroformu.

Výsledky referenční skupiny můžeme vidět obr. 12 a na obr. 13 vidíme fotografii porušení lepeného spoje.[14]



Obr. 12 Výsledky trhací zkoušky referenční skupiny A1 – lepený spoj slitin X610-T4PD a X624-T4P pomocí lepidla A1, A2 – lepený spoj slitin X610-T4PD a X626-T4P pomocí lepidla A2. Převzato z [14]

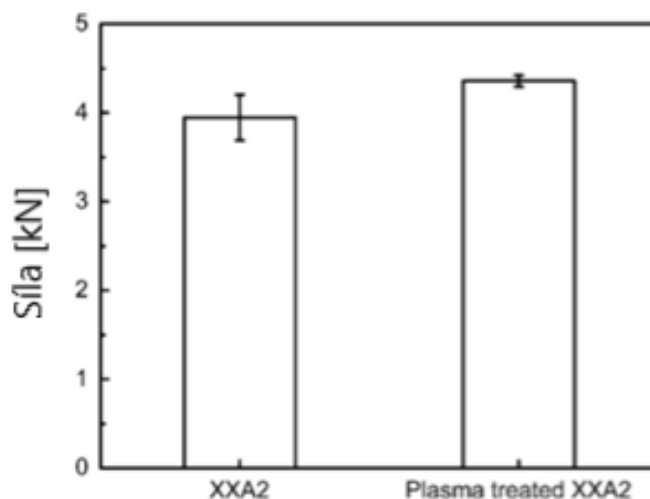


Obr. 13 Fotografie porušení lepeného spoje referenční skupiny vzorků. Převzato z [14]

Na fotografiích vidíme, že u skupiny s lepidlem A1 došlo ke koheznímu lomu, zatím co u skupiny lepené lepidlem A2 došlo ke kombinovanému lomu.[14]

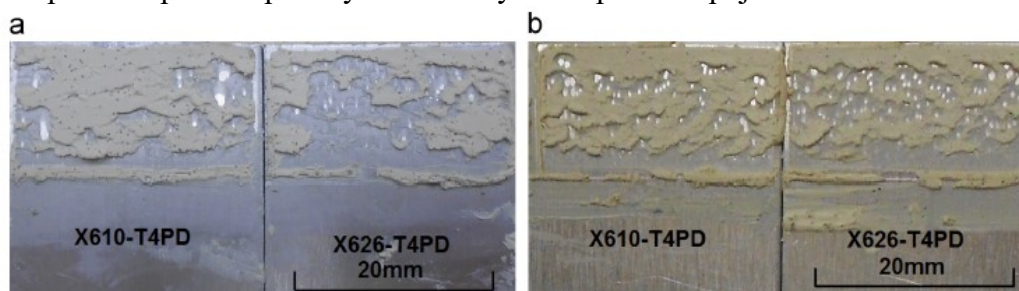
Teoretický rozbor

Následovala skupina vzorků, která byla plazmaticky upravena. Plazmatická úprava spočívala v oplachu v trichlorethanu a následném plazmování rychlostí 5 mm/s s průtokem inertního plynu 30 l/min. Hubice plazmy byla vzdálená 5 mm od vzorků. Testována byla už jen skupina s lepidlem A2 a srovnání výsledků zkoušek vidíme na obr. 14 a srovnání fotografií lomu na obr. 15.[14]



Obr. 14 Porovnání síly potřebné k lomu lepeného spoje vlevo – bez plazmové předúpravy, vpravo – s plazmovou předúpravou povrchu. Převzato z [14]

Úpravou povrchu pomocí plazmy dosáhli zvýšení lepeného spoje o 11%

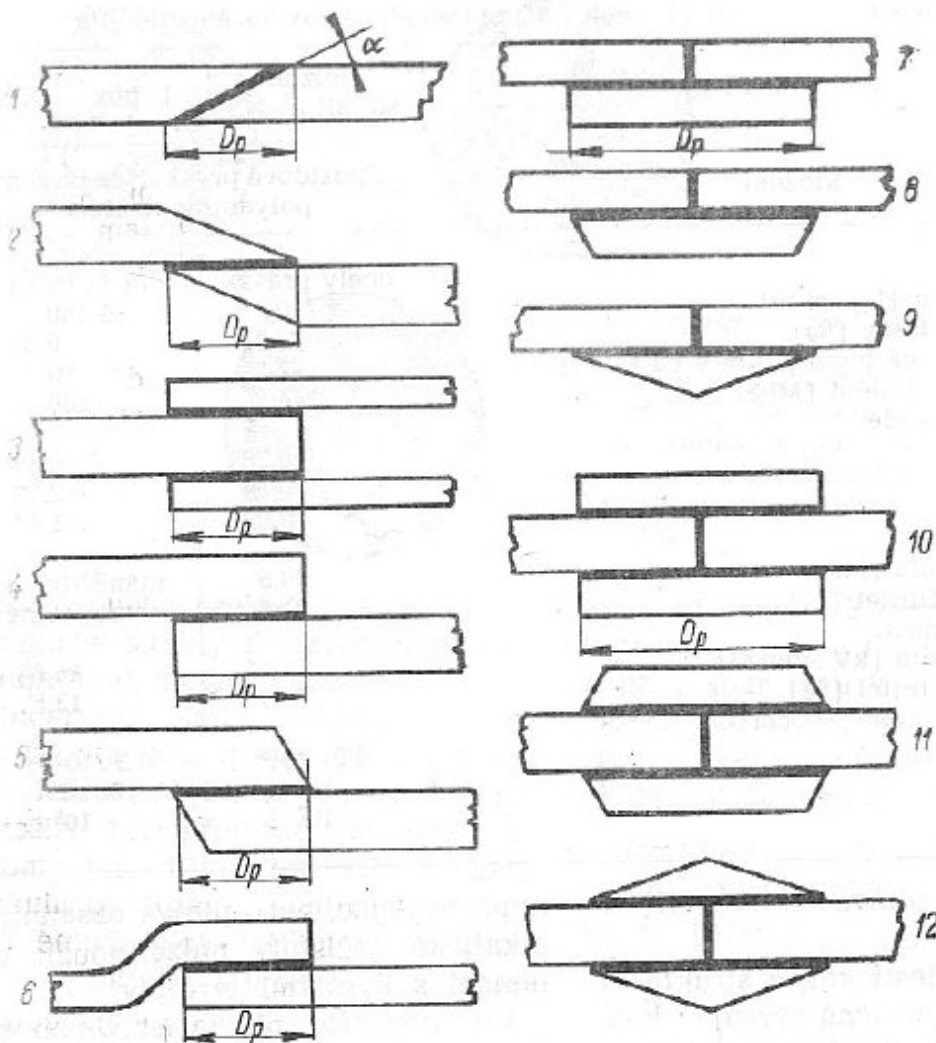


Obr. 15 Porovnání lomu lepeného spoje a– bez plazmové předúpravy, b–s plazmovou předúpravou povrchu. Převzato z [14]

Díky plazmové úpravě povrchu se zvýšila adhezní schopnost slitiny X626-T4PD a tím zvýšila samotnou pevnost lepeného spoje.[14]

1.3 Konstrukce lepených spojů

Konstrukce lepeného spoje musí odpovídat typu namáhání, kterému daný lepený spoj bude odolávat, proto lepené plochy tomu musíme přizpůsobit. Mezi hlavní namáhání lepených spojů řadíme tah, tlak, smyk, krut a odlupování. Při odlupování a kroucení lepeného spoje dochází k lokálnímu přetížení a poškození filmu lepeného spoje, a proto je nutné obezřetně volit typ tohoto spojení. Také při spojení čelních ploch tzv. spojích na tupo, které jsou namáhány hlavně na tah a tlak, je možno volit pouze při dostatečně velké styčné ploše. Optimálních mechanických vlastností dosáhneme při konstrukci lepených spojů s použitím přeplátovaných spojů s uměle zvětšenou spárou. Díky této konstrukci je spoj převážně namáhán na smyk. Ukázky konstrukčních variant těchto spojů vidíme na obr. 16.[1]

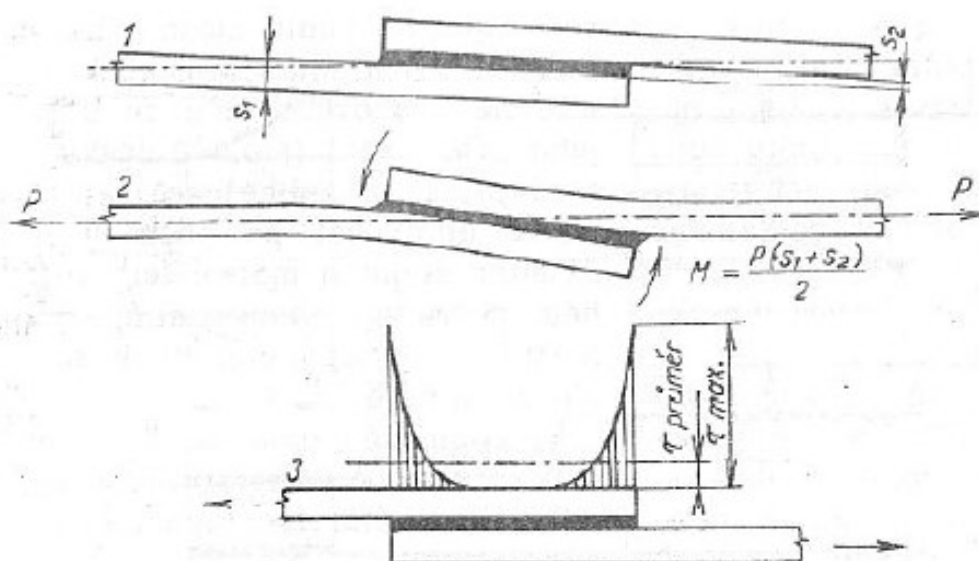


Obr. 16 Přeplátované spoje 1- tupý zkosený, 2- jednoduše přeplátovaný zkosený, 3- dvojité přeplátovaný, 4- jednoduše přeplátovaný, 5- jednoduše přeplátovaný zkosený, 6- lemový, 7- čelní s jednou příložkou, 8 a 9- čelní s různými příložkami, 10- čelní se dvěma příložkami, 11 a 12 – čelní se dvěma různými příložkami. Převzato z [1]

1.3.1 Přeplátované spoje

Jak již bylo zmíněno, tyto spoje jsou vhodné pro odolávání mechanickému zatížení a používají se pro slepení tenkých materiálů jako jsou plechy, polymerové fólie a papír. Je to dáno tím, že u tohoto spoje lze zanedbat ohybový moment vyvolaný excentrickým zatížením spoje. Avšak jednostranně přeplátované spoje trpí na hromadění napětí na obou koncích spoje v důsledku působení excentrických sil, což má za následek odlupování. Tento jev máme znázorněný na obr. 17. Při působení kritického zatížení dojde k hraničnímu zvýšení zatížení na obou koncích lepeného spoje a dojde k porušení filmu lepidla a tím k roztržení spoje.

[1]



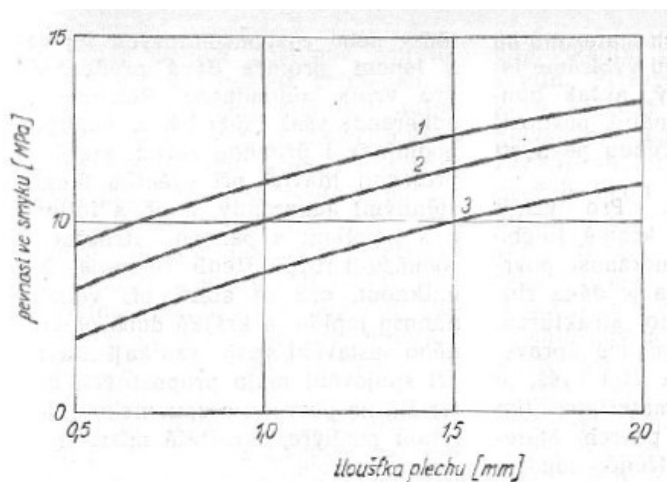
Obr. 17 Deformace jednostranně přeplátovaných spojů. Převzato z [1]

Dalším důležitým parametrem přeplátovaných spojů je délka přeplátování, ta závisí na tloušťce a druhu materiálu. Obecně lze říci, že délka musí být nejméně pětinasobkem tloušťky. Matematické vyjádření vztahu délky spoje a pevnosti je složité a také nepřesné z důvodu deformace spáry. Nicméně vliv délky a typ přeplátování na pevnost spoje vidíme na obr. 18. [1]

Typ spoje	Nosnost $N \text{ mm}^2 (\%)$		Pevnost ve smyku MPa (%)	
	při $D_p = 10 \text{ mm}$	při $D_p = 20 \text{ mm}$	při $D_p = 10 \text{ mm}$	při $D_p = 20 \text{ mm}$
1 	100	100	100	100
2 	61	100	67	56
3 	70	86	79	44
4 	56	64	54	32

Obr. 18 Typy překlátovaných spojů a jejich pevnosti. Převzato z [1]

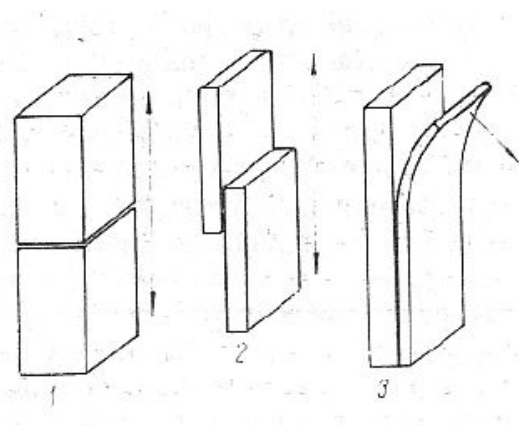
Zde je brán jako 100 % standard čelní jednoduše zkosený spoj. Dále lze z tabulky vyčíst, že s rostoucí délkou překlátovaného spoje roste také nosnost a odolnost spoje, ale klesá pevnost ve smyku, podobný vztah platí i pro šířku spoje. Dále lze zvýšit pevnost ve smyku lepeného spoje zvětšením tloušťky lepených materiálů a tím zvýšit tvarovou stálost a snížit deformaci lepených ploch, která vede k odlupování. Závislost těchto hodnot vidíme na obr. 19. [1]



Obr. 19 Závislost tloušťky plechu na pevnosti ve smyku 1- délka překlátování 15 mm, 2- délka překlátování 12,5 mm, 3- délka překlátování 10 mm. Převzato z [1]

2 Mechanické vlastnosti a zkoušení lepených spojů Al slitin.

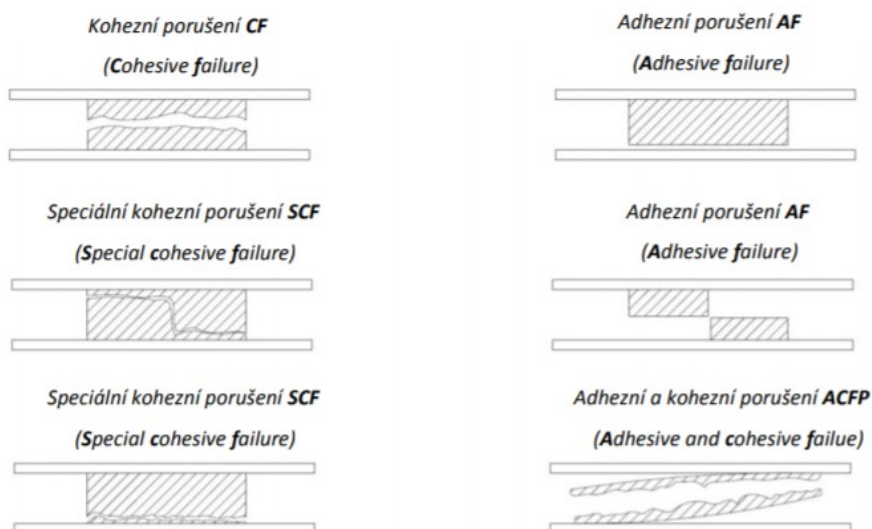
Zkoušky mechanických vlastností hodnotí pevnost spoje nebo odolnost na namáhání ve smyku, tahu, odloupávání a v nárazové práci, schéma těchto namáhání vidíme na obr. 20. Mezi doplňkové zkoušky můžeme zařadit zkoušku pevnosti spojů při statickém namáhání nebo zkoušky trvalé pevnosti za specifických podmínek například za zvýšené teploty nebo vlhkosti. Výsledky těchto zkoušek slouží nejen ke kontrole nebo zkoušce lepeného spoje, ale také pro konstrukční výpočty.[6], [1]



Obr. 20 Hlavní typy namáhání lepených spojů 1- tah, 2- smyk, 3- odlupování. Převzato z [1]

2.1 Destruktivní zkoušky mechanických vlastností

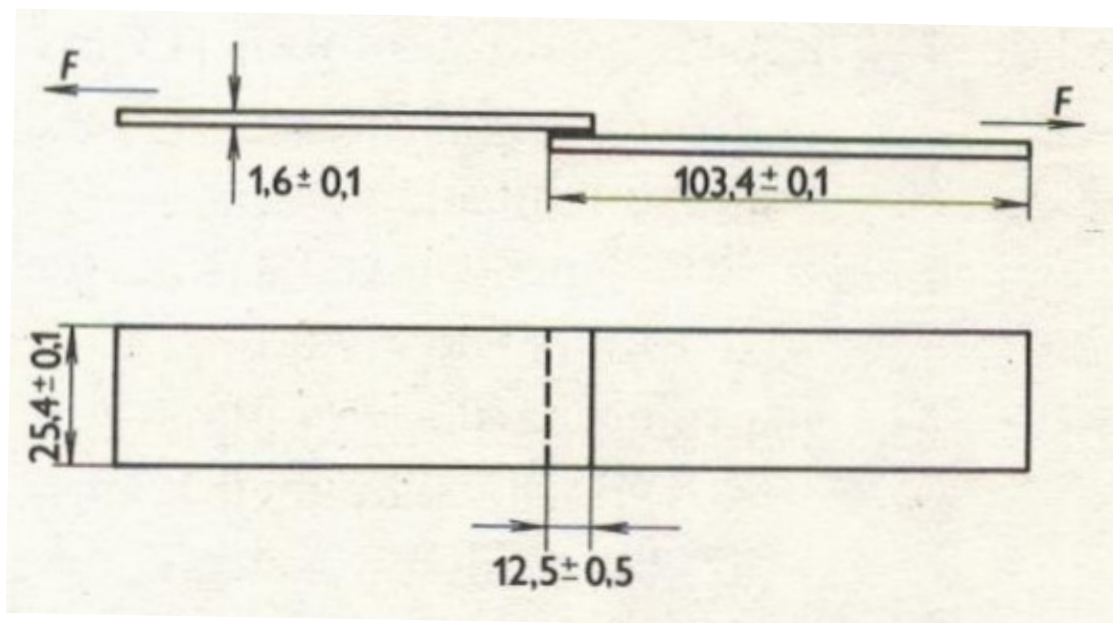
Mezi hlavní metody hodnocení lepených spojů převažují metody destruktivní, to jsou takové metody, při kterých dochází ke zničení testovaného vzorku, na obr. 21, vidíme klasifikaci porušení dle normy ČSN ISO 10365. [15]



Obr. 21 Klasifikace porušení lepeného spoje dle normy ČSN ISO 10365. Převzato z [15]

2.1.1 Zkouška lepených spojů ve smyku

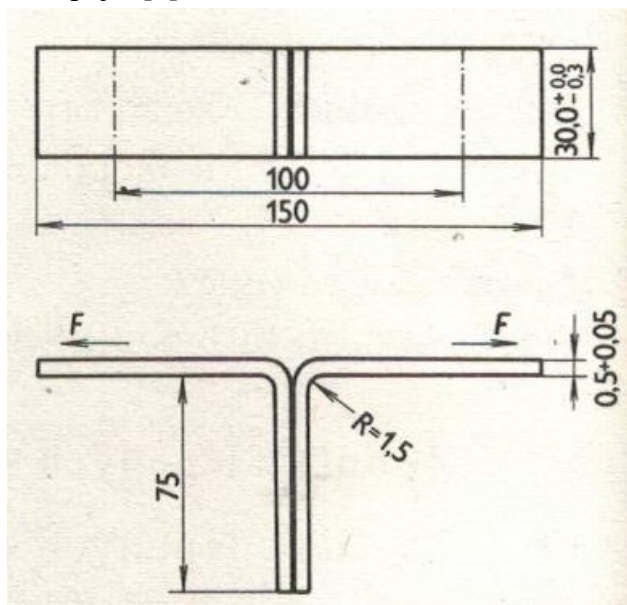
Tato zkouška je vhodná pro spoje překlátované, trubkové nebo násuvné. Podstatou zkoušky je namáhání překlátovaného spoje statickým tahem ve směru podélné osy do porušení spoje. Výsledkem zkoušky je pevnost ve smyku udávaná v MPa. Schéma zkoušky vidíme na obr. 22. Tato zkouška je vhodná hlavně pro lepené spoje kovových materiálů. U plastů může docházet k vychýlení nebo deformaci roviny lepeného spoje, čímž dochází k chybě a zkreslení výsledků, a proto u této zkoušky pro plasty byly navržnuty úpravy pro zpřesnění výsledků. Důvodem zkreslení je různý modul pružnosti filmu lepidla a lepeného plastu a vzniku nerovnoměrného rozložení sil v lepeném spoji. [1]



Obr. 22 Schéma vzorků pro zkoušku pevnosti ve smyku. Převzato z [6]

2.1.2 Zkouška pevnosti lepených spojů v odlupování podle Wintera

Zkouška spočívá v namáhání zkušebního spoje statickým tahem ve směru kolmém na lepený spoj, čímž dochází k odlupování, schéma zkoušky vidíme na obr. 23. Výsledkem zkoušky je pevnost v odlupování udávána v $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$, tím rozumíme sílu potřebnou na šířku lepeného spoje k porušení spoje. [1]



Obr. 23 Schéma vzorku pro zkoušku v odlupování. Převzato z [6]

Pevnost v odlupování při určité teplotě je dána dvěma vztahy:[1]

$$\sigma_{WA}^{20} = \frac{F_a}{b} \quad \sigma_{WS}^{20} = \frac{F_s}{b} \quad [6]$$

Kde: σ_{WA}^{20} - je počáteční pevnost v odlupování [Nmm^{-1}]

σ_{WS}^{20} - je střední pevnost v odlupování [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]

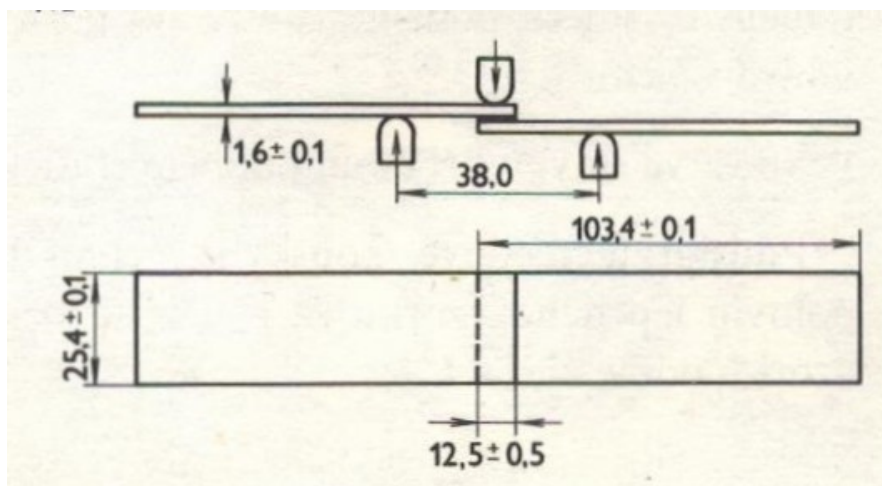
F_A – maximální síla [N]

F_S – Průměrná síla [N]

b – šířka lepeného spoje s přesností na 0,1 mm [6]

2.1.3 Zkouška lámavosti lepených spojů

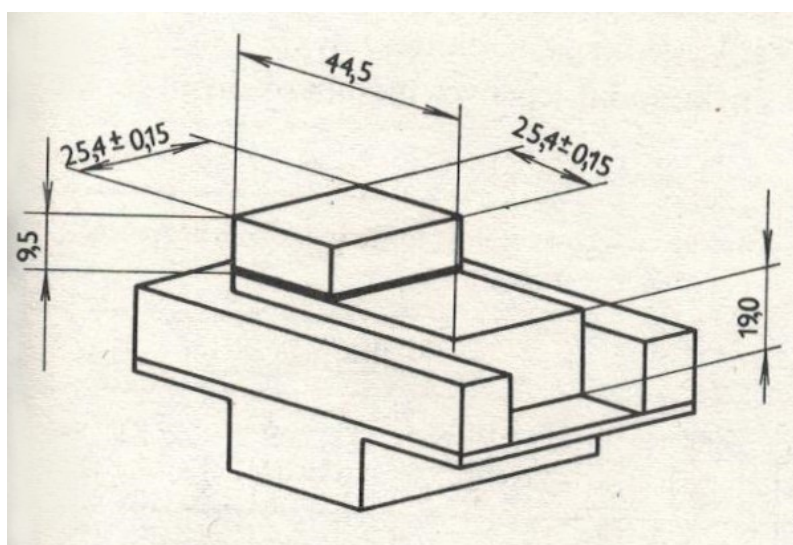
Podstatou zkoušky lámavosti je namáhání statickým ohybem do rozlomení, jak vidíme na obr. 24. Zkouška se hodí především pro hodnocení spojů tvrdých materiálů jako je například spojení kov-kov nebo kov-plast. Lámavost se udává v N/vzorek. [6]



Obr. 24 Schéma vzorku pro zkoušku lámavosti. Převzato z [6]

2.1.4 Zkouška rázové pevnosti

Zkouška rázové pevnosti je založena intenzivní krátkodobě působící síle, která namáhá tlakem lepený spoj na smyk ve směru podélné osy až do roztržení vzorku. Zpravidla se k této zkoušce používá Charpyho kladivo a vzorek umístěný jako na obr. 25. Výsledkem zkoušky je hodnota nárazové pevnosti [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$]. Rázová pevnost je nejmenší možná síla k roztržení spoje.[6]



Obr. 25 Schéma vzorku pro zkoušku nárazové pevnosti. Převzato z [6]

2.1.5 Zkouška pevnosti ve smyku při statickém namáhání.

Při této zkoušce měříme vzájemné posunutí obou polovin lepeného vzorku, který je zavěšen a zatížen předem definovanou silou na definovanou dobu například 100, 1000, 10 000 hodin. Při této zkoušce zpravidla používáme více testovacích vzorků pro zprůměrování hodnot. Dále při této zkoušce nesmí dojít k porušení lepého spoje. Využívá se stejného přeplátovaného spoje jako na obr. 22. Díky této zkoušce lze ověřit i creepové vlastnosti lepidla a zjistit mez tečení. [6]

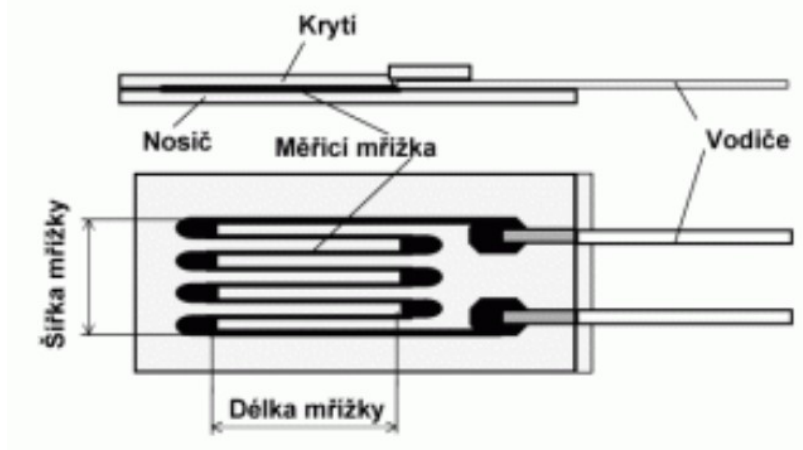
2.2 Metody měření posuvů

K měření posuvů při trhací zkoušce můžeme zvolit jak kontaktní, tak bezkontaktní metody. Například tenzometry patří nejčastějším používaným typem kontaktních měřidel pro posuvy. Kontaktní měření znamená, že tenzometr je fyzicky nalepen na zkoušeném vzorku. Zatímco bezkontaktní měřidla nejsou v žádném kontaktu se zkoušeným vzorkem a pouze snímají jeho povrch, jako například metoda korelace obrazu. Všechna tyto měřidla zaznamenávají posuv a výsledné napětí se následně dopočítává s pomocí dat z trhacího stroje.

2.2.1 Tenzometry

Tenzometrický průtahoměr je pasivní elektronická součástka, která měří deformaci na nalepeném vzorku. Tenzometry převádí mechanickou deformaci vyvolanou tahovou zkouškou na elektrický signál. Princip tohoto převodu je postaven na známém faktu, že odpor elektrického vodiče (tenzometru) je přímo úměrný jeho délce a naopak nepřímo úměrný svému průřezu. Konstrukce obyčejného tenzometru se skládá z tenkého vodiče na fólii z polyamidu. Z důvodu zvýšení efektivity tenzometru je vodič meandrovitě poskládán na fólii, tak abychom dosáhli co nejdelší efektivní délky, jako vidíme na obr. 26. Při samotné zkoušce dochází k protažení testovaného vzorku, na kterém je samotný tenzometr přilepen, tím dochází k natažení vodiče a také ke snížení jeho průřezu, což má za následek zvýšení odporu tenzometru. Právě tento nárůst odporu měříme a následně převádíme na napětí/deformaci. Stejného principu, avšak opačného výsledku, dosáhneme při tlakové zkoušce, kdy se vodič zkracuje a zvětšuje se jeho průřez. Velkou nevýhodou základních tenzometrů je schopnost měření napětí pouze v jedné ose a to té, která je shodná s podélnou osou vodiče tenzometru. Tuto nevýhodu lze řešit přidáním dalšího tenzometru, který bude snímat i jinou osu namáhání nebo použít tenzometry speciální konstrukce.

Jedním z důležitých parametrů, na který si musíme dát při výběru tenzometru pozor je jeho citlivost. Citlivost tenzometru je bezrozměrná jednotka, která nám udává poměr mezi relativní změnou odporu k velikosti působícího napětí.[24]



Obr. 26 Schéma tenzometru. Převzato z [24]

2.2.2 Video extenzometr

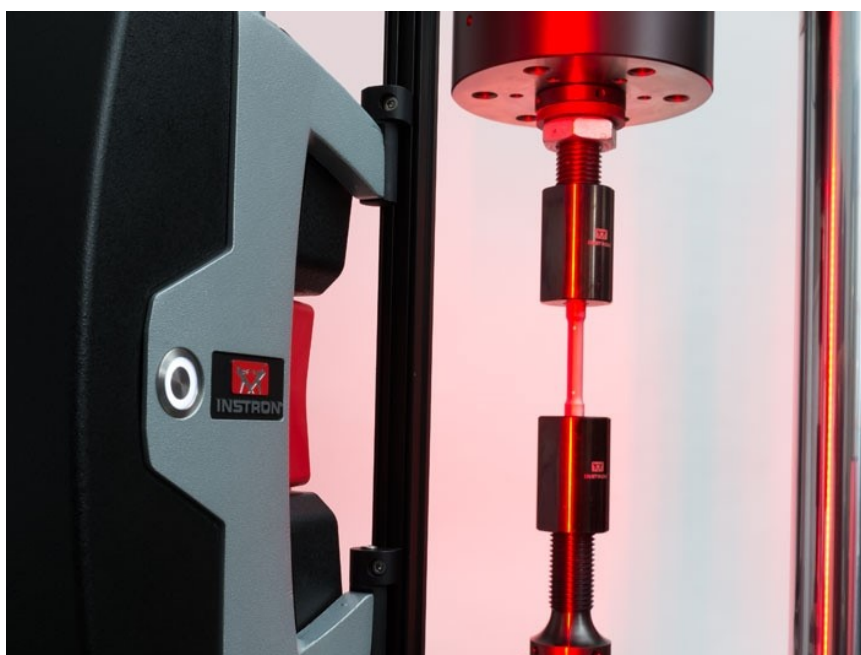
Konstrukce videoextenzometru se skládá ze speciální videokamery s vysokým rozlišením nebo z vysokorychlostní kamery, které zaznamenávají zkušební vzorek, jako vidíme na obr. 27. Velkou výhodou je, že celé měření probíhá bezkontaktně. Při využití kamery s vysokým rozlišením je nutno na vzorek rozmístit kontrastní značky. Tyto značky jsou nejčastěji ve formě teček nebo řádků a lze je na vzorek různě připevnit, i to lze vidět na obr. 27. Dále musí být videokamera spojena s PC pomocí optického kabelu, který zajišťuje dostatečný datový tok. Je nutno použít právě optický kabel z důvodu stabilního přenosu dat, který je zásadní pro tuto technologii. V PC dochází k samotnému vyhodnocení zkoušky pomocí algoritmu ve vyhodnocovacím programu. Program porovnává středy námi rozmístěných značek před a po deformaci. Při podélné i příčné deformaci má kontrastní značky středy čtyři pro zachycení obou os. Pozorujeme středy z důvodu možnosti deformace samotné značky a možné vnesení chyby do měření. Výhodou algoritmu a vyhodnocovacího programu je, že si sám změří testovaný vzorek před samotnou zkouškou a počítá i s následným odlehčením vzorku, čímž eliminuje chyby měření.[18]

Druhým zmíněným typem je použití vysokorychlostní kamery, označovaným jako HSC (high speed camera). Tyto kamery jsou schopny snímkovací frekvence až 20 000 snímků za vteřinu anglická zkratka FPS. I zde je nutno tuto kameru spojit s PC pomocí optického kabelu, z důvodů vysokého datového toku za vteřinu. Například při fps 20 000 a rozlišení 250x200 je datový tok 1Gb za sekundu. Z těchto důvodů se můžeme setkat s černobílými

Mechanické vlastnosti a zkoušení lepených spojů Al slitin

vysokorychlostními kamerami, které díky odstínům šedi snižují datový tok. Tyto kamery využíváme u zkoušek mechanických vlastností, jako jsou nárazová práce, odolnost vůči průrazu nebo lomu a také je lze využít při zkoušce tahem za zvýšené rychlosti zatěžování. Díky digitálnímu záznamu můžeme zkoušku zpětně detailně zkoumat nebo například zhodnotit, zdali se nám podařilo zkoušku správně nasnímat, v opačném případě záznam smazat a zkoušku opakovat.[18]

Při obou zde zmíněných kamerách videoextenzometru je velice zásadní zajistit dostatek světla na snímaném povrchu. Před samotnou zkouškou je nutné zajistit zdroj světla s příkonem několik kilowattů, jako jsou například halogenová světla a výbojková svítidla. [18]



Obr. 27 Videoextenzometr. Převzato z [25]

2.2.3 DIC metoda

DIC (digital image correlation) je bezkontaktní metoda pro měření deformace testovacích vzorků za pomoci kamer s vysokým rozlišením. Jedná se o velmi všestrannou metodu pro vyhodnocení deformace testovacích vzorků. Hlavní výhodou oproti tenzometrům je celoplošné a bezkontaktní měření. [16]

DIC je metoda analýzy obrazu v plném poli založená na digitálních obrazech šedých hodnot, které dokáží určit obrys a posuvy objektu při zatížení ve třech směrech. Vzhledem k rychlému vývoji v oblasti počítačových technologií a digitálních fotoaparátů s vysokým rozlišením pro statické i dynamické aplikace se aplikace této metody měření rozšířily a technologie DIC se ukázala jako flexibilní a užitečný nástroj pro analýzu deformací.[16]

Záznam této metody může být pořizován na jednu, dvě nebo dokonce více kamer. Při využití pouze jedné kamery je snímaná rovina rovnoběžná s kamerou a lze tak určit výsledný posuv a rotaci. Použijeme-li dvě a více kamer, poté lze výsledné měření promítnout do 3D prostoru. Soustavu dvou kamer vidíme na obr. 28. Kamery jsou od sebe vzdáleny o námi známou vzdálenost a také natočeny pod specifickým úhlem. Kamery zaznamenávají body na cíleném objektu nezávisle na sobě, poté se pomocí počítače a algoritmu zaznamenané body převedou do trojrozměrného prostoru.[17]

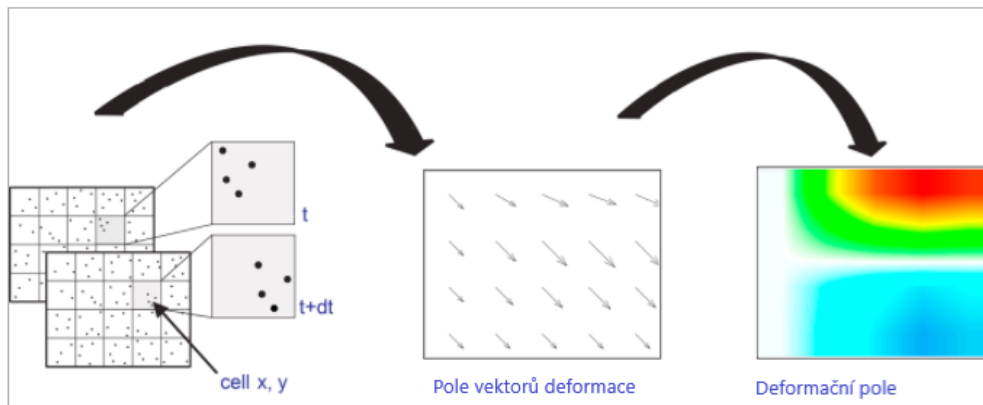


Obr. 28 Soustava dvou měřících kamer pro DIC metodu. Převzato z [16]

Princip měření DIC

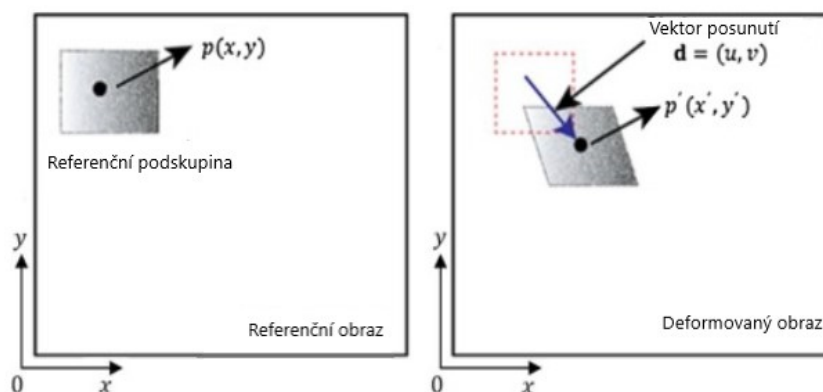
Tato metoda se zakládá na výpočtu změny měřeného povrchu, respektive na výpočtu změny polohy zaznamenávaných bodů povrchu před a po deformaci nebo také během deformace. Celá měřicí soustava se skládá z jedné nebo více kamer a výpočetního zařízení. Kamerový záznam je vyhotoven ve stupních šedi, právě hodnota a pozice šedi během testování je zaznamenávána pro další výpočet. Takto získané obrazy z obou kamer se skládají do 3D digitálního obrazu pomocí algoritmu. Jejich informace se porovnávají mezi dalšími následujícími obrazy zaznamenanými během testu, takto získáváme posunutí sledovaných bodů. V reálném použití nesledujeme každý jednotlivý bod, ale jistou skupinu (region) pixelů. Tento posuv se vypočítá pomocí matematické funkce korelace. Z posunutí jsou následně

pomocí výpočetního softwaru vypočítány vektory posunutí a následně lze dopočítat i poměrné deformace. Princip této metody vidíme na obr. 29. [18]



Obr. 29 Zjednodušené schéma DIC metody. Převzato z [19]

V předešlém odstavci jsme naznačili, že metoda DIC vychází z porovnávání snímků, které se pořizují v průběhu zkoušky. Díky tomu jsme schopni získat průběh posunutí a poměrných deformací. Vždy se porovnávají dva obrazy, které byly zaznamenány v časovém okně. První obraz před zatížením se nazývá referenční obraz a druhému obrazu po zatěžování se říká deformovaný obraz. Následně se definuje výpočetní oblast v referenčním obraze, která definuje oblast, ve které bude probíhat vyšetření posuvů a deformace. Tato oblast obsahuje množinu bodů (pixelů), která bude vyhodnocována. Následující zpracování digitálních obrazů spočívá v porovnávání bodů pixelů v referenční oblasti s polohami bodů v deformovaném obraze. Pro zjednodušení výpočtu se nevyužívá porovnání samotných pixelů, ale jejich skupin, podoblastí tzv. subset. Tyto oblasti jsou čtvercová pole o rozměrech $(2X+1) \cdot (2X+1)$ pixelů. Tato pole dále obsahují ve svém středu korelační bod P, vše výše pospané vidíme na obr. 30. Díky kontrastnímu nebo vzorovanému povrchu obsahují unikátní vzor, který výpočetní software rozezná. Samotná velikost těchto polí je důležitá, a proto nelze opomenout správně zvolit parametr X. Podoblast musí být dostatečně velká, aby šla dobře rozpoznat, ale zároveň se zvětšující se podoblastí roste délka výpočtu. [20]



Obr. 30 Schéma referenční a deformované podskupiny. Převzato z [20]

Jak už název napovídá po zatěžování se referenční podskupina deformuje a vzniká deformovaná podskupina, která již nemá čtvercový tvar. Z tohoto důvodu je každému bodu $R(x_i, y_i)$ pro i, j z intervalu $< -M, M >$, který leží v referenční podskupině v okolí bodu $P(x_0, y_0)$, přiřazen bod $P'(x'_i, y'_i)$ v deformované podskupině pomocí funkcí ξ a η . [21]

Rozlišujeme více řádů tvarových funkcí na základě stupně deformace. Funkce nultého řádu je základní funkce a lze tak pospat změnu polohy pouze tehdy, zda-li se všechny body podskupiny posunou stejně. To znamená, že nedojde ke změně tvaru, pouze k posunutí. Jedná se o nejjednodušší tvarovou funkci, nicméně v reálném prostředí nám nestačí, protože není schopna popsat složitější procesy. Pro tyto případy se hojně užívají tvarové funkce prvního řádu a to proto, že popisují velmi často nastalé deformace. Pro nejsložitější tvary zde máme tvarovou funkci druhého řádu, které je schopna popsat i velice složité deformace. Tvarové funkce všech výše popsanych řádů vidíme na obr. 31. [21]

$$\xi_0(x_i, y_j) = u \qquad \eta_0(x_i, y_j) = v \quad \text{Tvarová funkce 0. řádu}$$

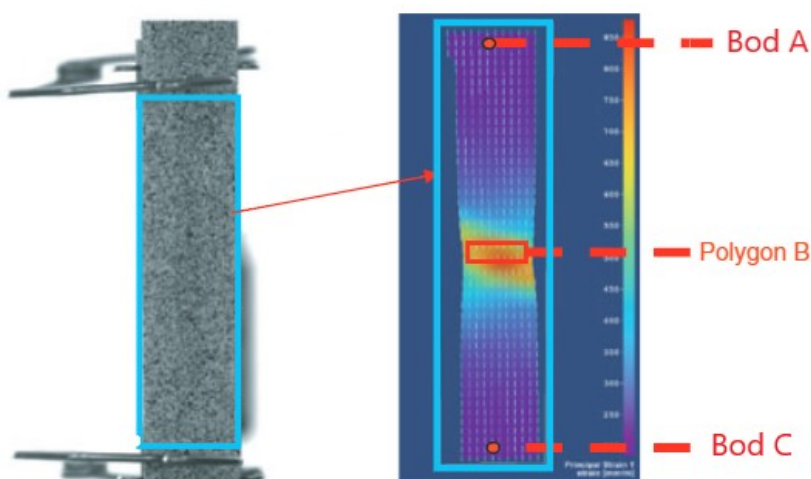
$$\begin{aligned} \xi_1(x_i, y_j) &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad \text{Tvarová funkce 1. řádu}$$

$$\begin{aligned} \xi_2(x_i, y_j) &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta x \Delta y \\ \eta_2(x_i, y_j) &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad \text{Tvarová funkce 2. řádu}$$

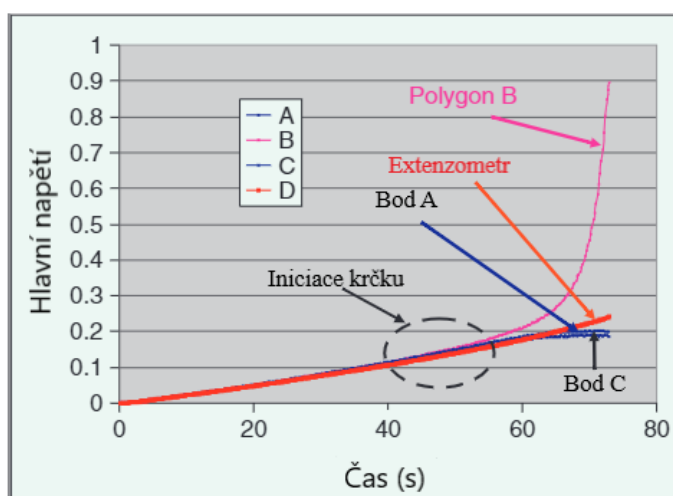
Obr. 31 Tvarové funkce. Převzato z [21]

Využití DIC při zkoušce tahem

Jednou z hlavních výhod využití technologie DIC při trhací zkoušce tahem je možnost bezkontaktního sledování průběhu napětí/deformace na celém povrchu vzorku, což stávající technologie nedovolují. Díky tomu oproti běžné metodě pomocí extenzometru jsme schopni pozorovat napětí jak v difúzním, tak v lokálním napěťovém krčku, zatímco extenzometrická metoda nám udává pouze napětí v celém vzorku ukázkou porovnání metod, vidíme na obr. 32. Pomocí DIC jsme schopni pozorovat změnu napětí v každém bodě a následně data změřená pomocí DIC porovnat s běžně naměřenými daty. Atraktivní vlastností je možnost námi rozmístit po testovaném vzorku až tisíce bodů, na kterých budeme následně pozorovat změnu napětí/deformace, jako vidíme na obr. 33. Dalším pozitivem je, že při DIC nevyužíváme laser, ale běžné bílé světlo. Srovnání DIC metody a extenzometrické vidíme v tab. 7. [22]



Obr. 32 Ukázka vzorku při DIC. Převzato z [22]



Obr. 33 Porovnání naměřených napětí pomocí DIC a extenzometru. Převzato z [22]

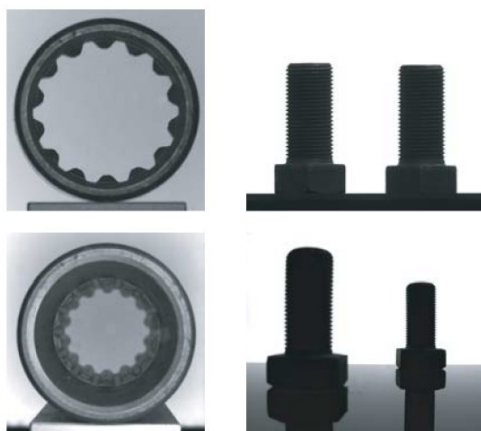
Tab. 7 Porovnání vlastností DIC a extenzometru. Převzato z [23]

DIC	Extenzometr
Bezkontaktní měření	Kontaktní měření
Neomezený počet měření	Extenzometr lze využít pouze na jedno měření
Vzorek nemusí být hladký a není omezen ani materiálem	Lze využít pouze na hladké povrchy
Měření ve všech třech osách x, y, z	Měření probíhá pouze v jedné ose
Měří se celý povrch vzorku	Měří pouze úzkou oblast, kde je extenzometr nalepen
Měří reálnou hodnotu deformace	Hodnoty měření jsou limitovány konstrukcí extenzometru
Rychlá příprava vzorků (rozmístění černých bodů po bílém vzorku)	Časově náročná instalace extenzometru lepením a dalšími přípravami

Nicméně i DIC má své specifika a limity. Pro měření je nutné zajistit umělé osvětlení pro správné fungování kamery a také je nutno pro měření zajistit kalibrační destičky v závislosti na velikosti měřeného vzorku. V neposlední řadě je nutné zajistit dostatek paměťové kapacity pro uchovávání zaznamenaných snímků a k získání výsledků měření. [23]

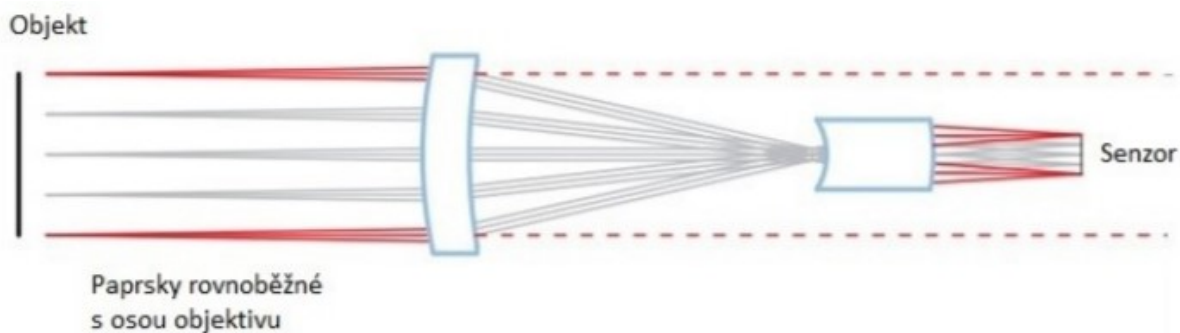
Princip funkce telecentrického objektivu

Telecentrické objektivy mají dnes široké uplatnění díky strojovému vidění, dimenzionálnímu měření anebo také díky metodě DIC. Tyto objektivy dovolují naprosto přesné měření tvarů a rozměrů sledovaného objektu. Dokonce přesnost měření pomocí telecentrického objektivu je větší než u některých laserových metod. Hlavní vlastností tohoto objektivu je zobrazování s konstantním zvětšením bez ohledu na vzdálenost a perspektivu od objektivu, ukázkou tohoto zobrazení vidíme na obr. 34. [27]



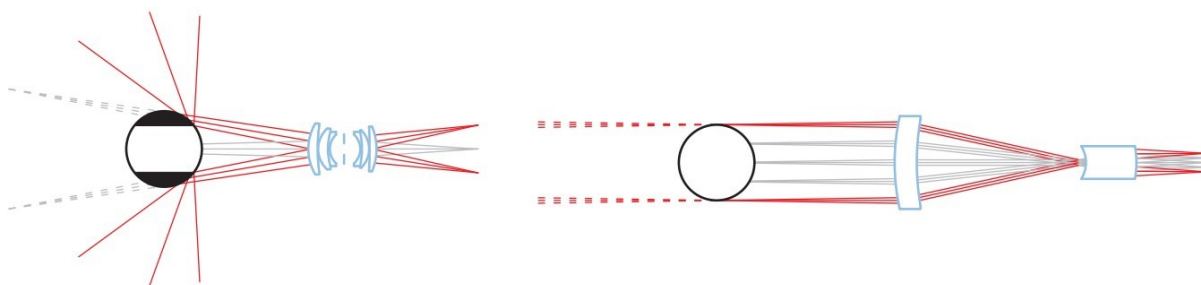
Obr. 34 Srovnání snímků telecentrického (nahore) a klasického (dole) objektivu. Převzato z [28]

U telecentrických objektivů zůstane velikost obrazu nezměněna bez ohledu na vzdálenost od objektu za předpokladu, že objekt zůstane v určitém rozsahu, také nazývaném jako hloubka pole nebo telecentrický rozsah. Tohoto jevu je dosaženo konstrukcí objektivu, který snímá pouze paprsky přicházející rovnoběžně s osou objektivu viz obr. 35. Narozdíl od běžných objektivů, kde jsou snímány paprsky ze všech směrů. [27],[28]



Obr. 35 Snímání telecentrického objektivu. Převzato z [28]

Díky tomu obrazy z telecentrického objektivu dosahují vysokých přesností bez vnesených chyb perspektivou. Perspektiva je jev, kdy se obraz zmenšuje s rostoucí vzdáleností stejně jako funguje lidské oko, nicméně pro přesné měření rozměrů je tento jev nevhodný. Také díky rovnoběžnosti paprsků směřujících do objektivů nedochází k lámání paprsků na hranách snímaného objektu, což zvyšuje přesnost detekce hran na obrazu, jako vidíme na obr. 36. [28]



Obr. 36 Detekce hran pomocí telecentrického objektivu. Převzato z [28]

3. Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC

Tento experiment se zabývá pevností lepeného spoje v závislosti na předúpravě povrchu a technologií vytvrzení lepidla. K popisu dějů v průběhu tahové zkoušky byla použita digitální korelace obrazu. Mezi použité předúpravy povrchu byly zahrnuty technologie gravírování a laserového čištění. Následné vytvrzení lepidla probíhalo za zvýšených teplot v přípravku pro zajištění rovnoměrné spáry lepidla. Pro zajištění rovnoměrné spáry lepidla byla také otestovaná technologie přitlaku s pomocí vakua.

3.1. Návrh experimentu

Pro tento experiment byla vybrána hliníková slitina EN AW 5754 H111 a bylo použito lepidlo Loctite EA 9514. Tento experiment se snaží o prohloubení znalostí lepených spojů a závislosti předúpravy povrchu na pevnosti lepeného spoje. Konstrukce testovaného lepeného spoje byl jednoduše překládaný spoj. Mezi sledované předúpravy povrchu byla zahrnuta technologie gravírování, díky které na povrchu lepených vzorků vzniknou mechanické zámky. Mechanické zámky zvětší povrch lepeného spoje, což by se mělo příznivě odrazit na mechanických vlastnostech spoje. Jako další sledované předúpravy povrchu byly plochy čištěné pomocí gravírovacího laseru a průmyslového čistícího laseru. V dalším kroku bylo nanášeno lepidlo a vzorky byly umístěny do přípravku, ve kterém došlo k vytvrzení lepidla při teplotě 120 °C. Zde byla také vyzkoušena nová technologie vytvrzení lepidla ve vakuu, která má zajistit rovnoměrné rozložení přitlačných sil na povrch vzorku a tím zajistit rovnoměrnou spáru lepidla. Posledním krokem byla tahová zkouška do přetrhnutí vzorku dle normy ČSN EN 1465, kde byly sledovány vlivy předchozích metod a úprav na pevnost lepeného spoje ve smyku. Celý průběh tahové zkoušky byl monitorován pomocí metody digitální korelace obrazu se zaměřením na oblast lepeného spoje pro lepší pochopení dějů, které v průběhu zkoušky probíhaly v lepeném spoji.

3.1.1 Použitá slitina a lepidlo při experimentu

Pro tento experiment byla vybrána slitina EN AW 5754 H111, jejíž chemické složení vidíme v tab. 8 a mechanické vlastnosti v tab. 9. Tato slitina hliníku je legovaná hořčíkem, což zaručuje velmi dobrou odolnost vůči korozi, a proto je užívána na karosářské díly automobilů. Taktéž ji nelze tepelně vytvrdit a nebude tak docházet k ovlivnění vzorků při vytvrzování lepidla v peci. [29]

Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC

Tab. 8 Chemické složení slitiny EN AW 5754. Převzato z [29]

Označení		Složení [%]						
EN AW	DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
5754	AlMg3	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,1	≤ 0,5	2,6-3,6	≤ 0,3	≤ 0,2

Tab. 9 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 5754. Převzato z [29]

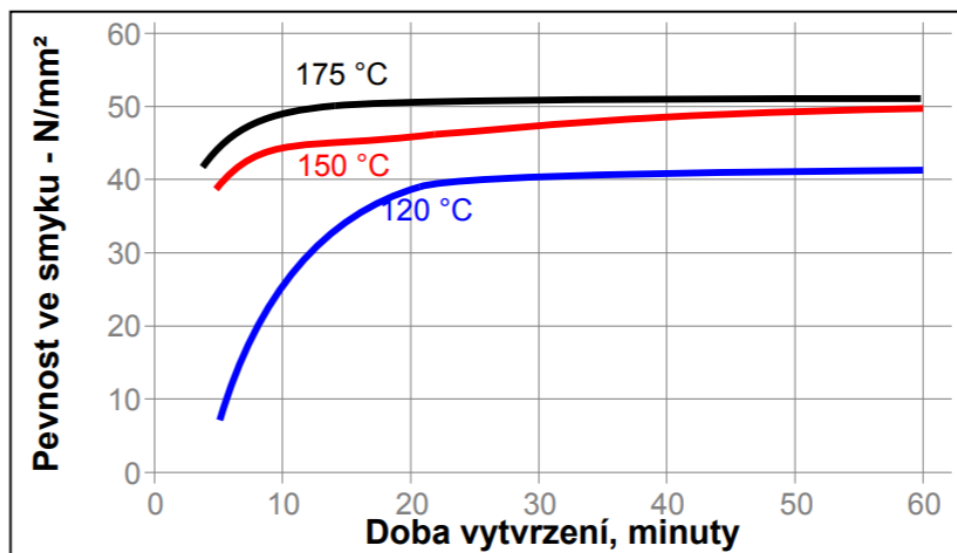
EN AW	Specifikovaná tloušťka [mm]	Pevnost v tahu [N/mm ²]	0,2% Mez kluzu [N/mm ²]	Tažnost [%]	Tvrdost [HBS]
5754	3–6	190–240	80	18	52

Pro tento experiment bylo použito jednosložkové epoxidové lepidlo Loctite EA 9514, jehož mechanické vlastnosti po vytvrzení při teplotě 150 °C po dobu 30 minut vidíme v tab. 10. Jedná se o houževnaté, teplem vytvrzující lepidlo disponující vysokou pevností ve smyku a odolností vůči rázům a loupáním, což je velice příhodné pro naše budoucí aplikace. [30]

Tab. 10 Mechanické vlastnosti lepidla Loctite EA 9514. Převzato z [30]

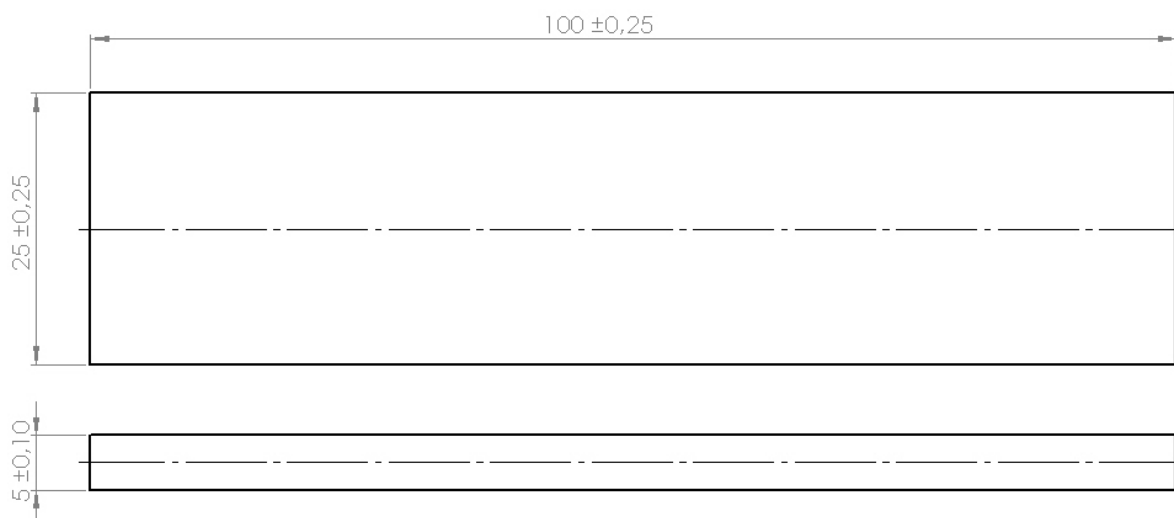
Označení	Pevnost v tahu [N/mm ²]	Pevnost v tlaku [N/mm ²]	Modul pevnosti v tahu [N/mm ²]	Prodloužení [%]
EA 9514	44	62	1460	5,8

Z důvodu použité vymešovací a přitlačné desky, které byly vyrobeny z kartitu, bylo použito vytvrzování při 120 °C, jak dovoluje technický list viz obr. 37. Celý tento proces byl monitorován pomocí termočlánků.



Obr. 37 Mechanické vlastnosti a rychlost vytvrzení v závislosti na teplotě. Převzato z [30]

Rozměry vzorků byly dodrženy dle normy ČSN EN 1465, 100x25x5 a nákres vzorků vidíme na obr. 38. Délku přeplátovaného spoje taktéž předepisuje norma na $12,5 \pm 0,25$ mm. [31]

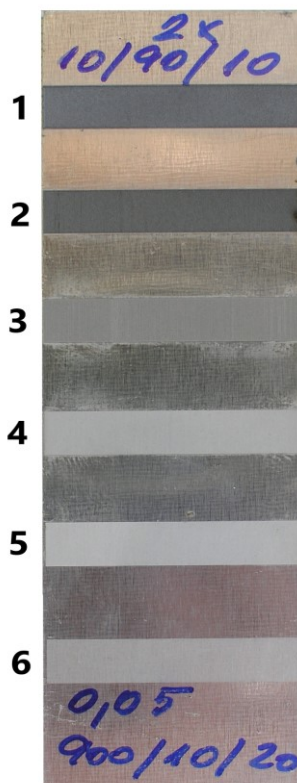


Obr. 38 Nákres testovacích vzorků. Převzato z [31]

3.1.2 Gravírování

Díky použitému lepidlu Loctite EA 9514 a spáře lepidla pouhých 0,05 mm bylo potlačeno kohézní porušení lepeného spoje. Nicméně samotná pevnost spoje byla přenesena na adhezi lepidla k podkladu, a proto bylo rozhodnuto o ověření navýšení adheze pomocí mechanických zámků vytvořených na lepených plochách. Tyto mechanické zámky budou vytvořeny technologií laserového gravírování. Mechanické zámky by měly zaručit navýšení plochy samotného lepeného spoje, což příznivě ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti.

Důležitým faktorem je hloubka vygravírovaných zámků, a proto byla uskutečněna zkouška parametrů gravírovacího laseru ve spolupráci s firmou Makoprint. Při této zkoušce byly hledány optimální parametry laseru, tak aby dosažená hloubka gravírování byla větší než 0,05 mm. Dále byly otestovány parametry gravírování tak, aby i tento gravírovací laser mohl být použit jako čistící, tak aby nedocházelo k úběru základního materiálu, ale zároveň docházelo k odpaření všech nečistot. Při zkoušce byl vždy vygravírován obdélník 25x5 mm do slitiny EN AW 5754. Testovací vzorek s vygravírovanými plochami vidíme na obr. 39.

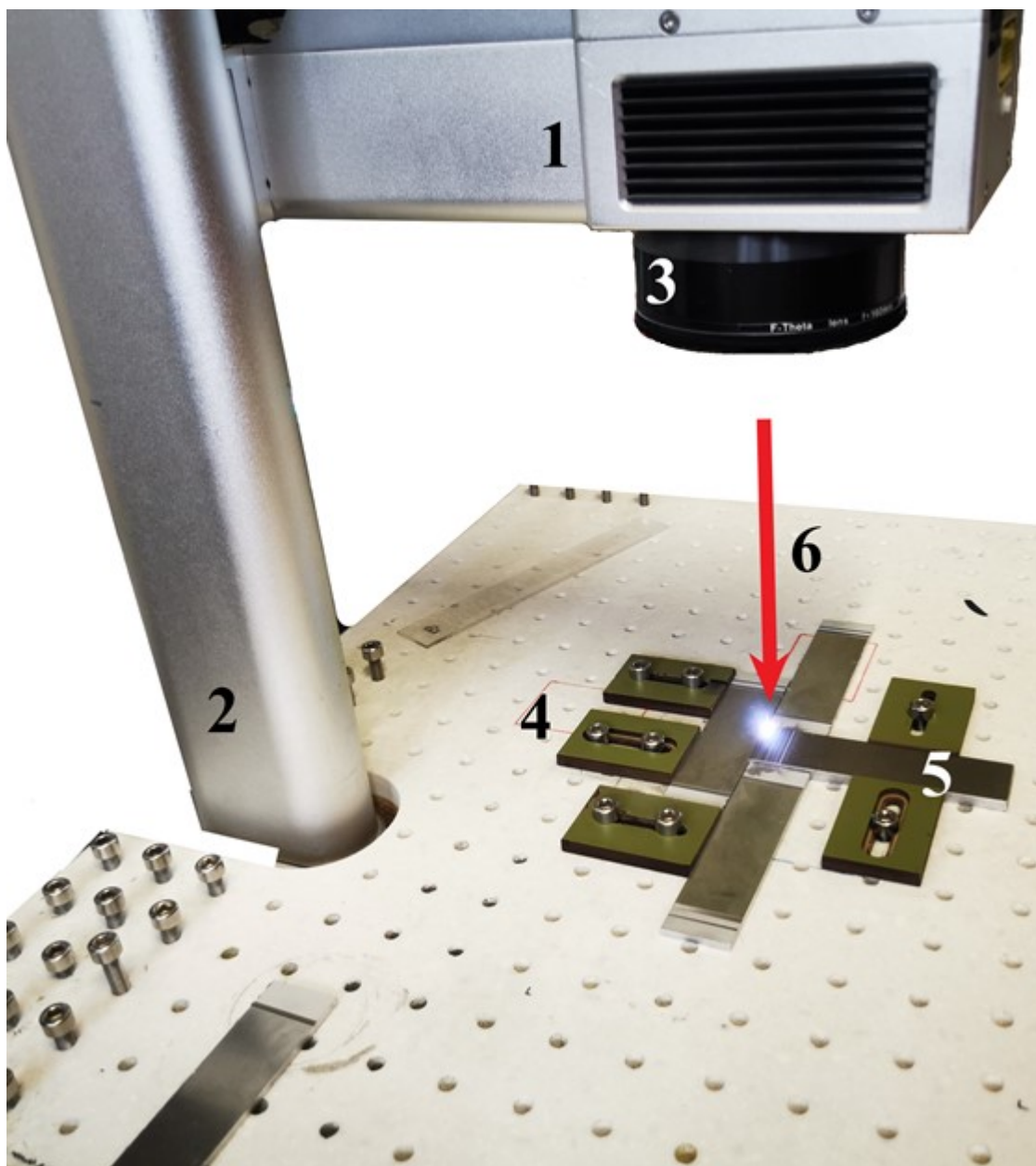


Obr. 39 Testovací vzorek s vygravírovanými obdélníky 25x5mm.

Všechny testované parametry vidíme v tab. 11. Parametry 1 a 2 jsou totožné, nicméně při gravírování plochy č.1 laser zopakoval stejnou dráhu 2x. Maximální výkon byl nastaven na 98 % a to z důvodu doporučení výrobce laseru. Použitý laser na 100 % svého výkonu je schopen pouze krátkodobých aplikací. Gravírovací laser vidíme na obr. 40.

Tab. 11 Parametry gravírovacího laseru při zkoušce hloubky zámků

Číslo plochy	Rozteč drah laseru [mm]	Rychlost posuvu [mm/min]	Výkon [%]	Frekvence [kHz]
1	0,005	10	98	10
2	0,005	10	98	10
3	0,015	300	80	20
4	0,02	500	60	20
5	0,02	900	40	20
6	0,05	900	10	20



Obr. 40 Sestava gravírovacího laseru.

- ➔ 1 – Gravírovací laser
- ➔ 2 – Stojan
- ➔ 3 – Čočka laseru
- ➔ 4 – Podložky pro ustavení vzorků
- ➔ 5 – Gravírovaný vzorek
- ➔ 6 – Směr gravírovacího paprsku

Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC

Pro určení výsledné hloubky byly vzorky podrobeny metalografickému výbrusu na katedře materiálového inženýrství na VŠB-TUO. Testovací vzorek s vygravírovanými plochami byl rozřezán a následně zalit do epoxidové pryskyřice, takto připravené vzorky byly vyleštěny a proběhlo měření na optickém mikroskopu. Připravený vzorek vidíme na obr. 41, konkrétně se jedná o měřené plochy 1 a 2. Vždy proběhla dvě měření hloubky a to na okrajích vygravírovaných ploch. Výsledky měření z metalografického výbrusu vidíme v tab. 12.



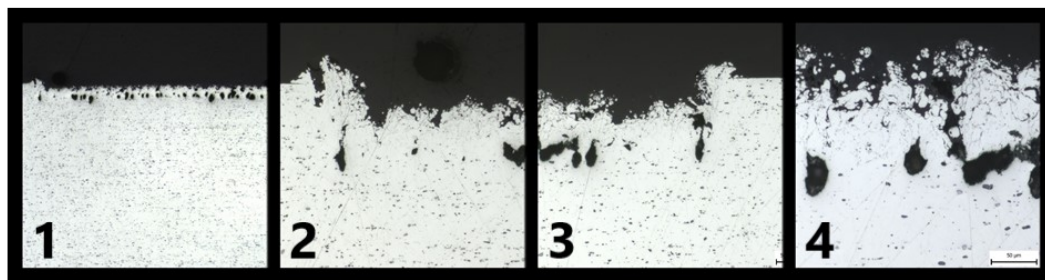
Obr. 41 Metalografický vzorek ploch 1 a 2.

Na obrázku vlevo vidíme řez plochami 1 a 2, vpravo vidíme sledovanou plochu řezu, jež je vyleštěná a připravená k měření.

Tab. 12 Výsledné hloubky po metalografickém výbrusu.

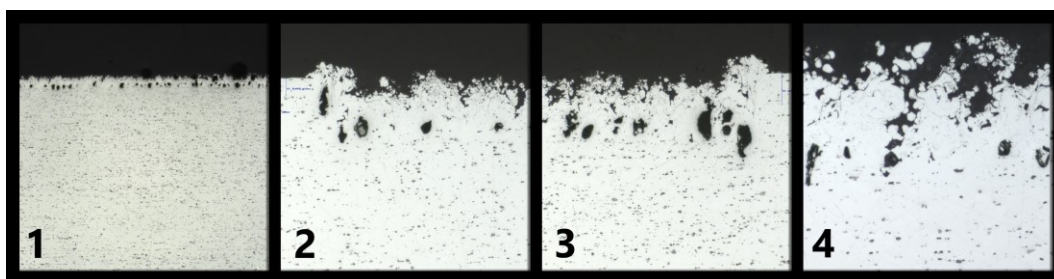
Číslo plochy	Hloubka 1 [μm]	Hloubka 2 [μm]	Hloubky s póry [μm]
1	104,68	106,47	194,67
2	38,49	69,78	167,1
3	20,5	34,89	
4	13,16	10,7	
5	5,44	5,26	
6	2,81	Nelze měřit	

Jak vidíme na výsledcích, námi požadované hloubky větší než 0,05 mm dosáhla pouze plocha č. 1. Plocha č. 2 sice v druhém měření vykázala hloubku cca 0,07 mm, avšak v první měření pouze cca 0,04 mm a nelze požadovanou hloubku zaručit po celé ploše. Pro čistící účely byly vybrány parametry testované plochy č. 5, které zaručí dokonalé odpaření všech nečistot. Při následném pozorování ploch č. 1 a č. 2 byly zaznamenány vzniklé póry po gravírovacím laseru. Tyto póry u plochy 1 a 2 můžeme vidět na obr. 42 a obr. 43.



Obr. 42 Metalografický výbrus plochy 1.

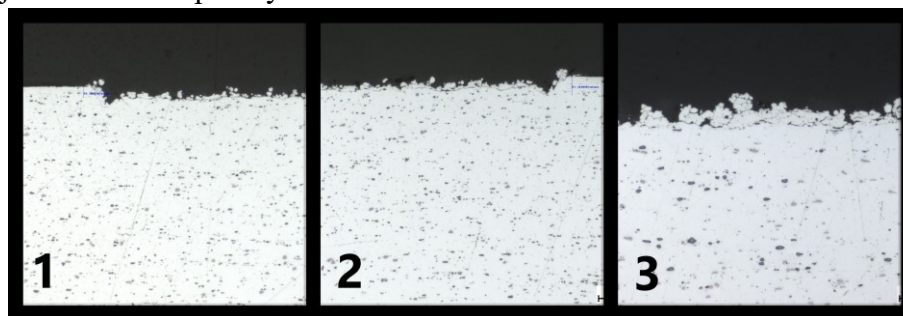
1- celá vygravírovaná plocha (zvětšení 20x) 2- hloubka 1 (zvětšení 100x), 3- hloubka 2 (zvětšení 100x), 4- hloubka 2 (zvětšení 200x).



Obr. 43 Metalografický výbrus plochy 2.

1- celá vygravírovaná plocha (zvětšení 20x) 2- hloubka 1 (zvětšení 100x), 3- hloubka 2 (zvětšení 100x), 4- hloubka 2 (zvětšení 200x).

Z obr. 42 a obr. 43 je patrné že výsledný povrch je velice členitý se spousty pórů a dutin, vzniklých v důsledku intenzivního paprsku laseru. Laserový paprsek dosáhl až na hloubku cca 0,2 mm, nicméně díky nedostatečnému odpařování materiálu a následnému tuhnutí došlo ke vzniku pórů. Tato skutečnost by měla být příznivá, a to na základě teorie o mechanické adhezi. Lepidlo do těchto dutin zateče a vznikne mechanicky prolutý systém lepidlo-adherend, čímž se zvýší pevnost lepeného spoje. Při 200násobném zvětšení si lze povšimnout částic, které nejsou nikterak spojeny s povrchem vzorku. Jedná se o krčky vzniklé deformací intenzivním laserovým paprskem, které v řezu nejsou spojeny s povrchem. Při snížení výkonových parametrů laseru se tyto děje neuskutečňují, jako vidíme na obr. 44. kde pozorujeme strukturu plochy č. 3.



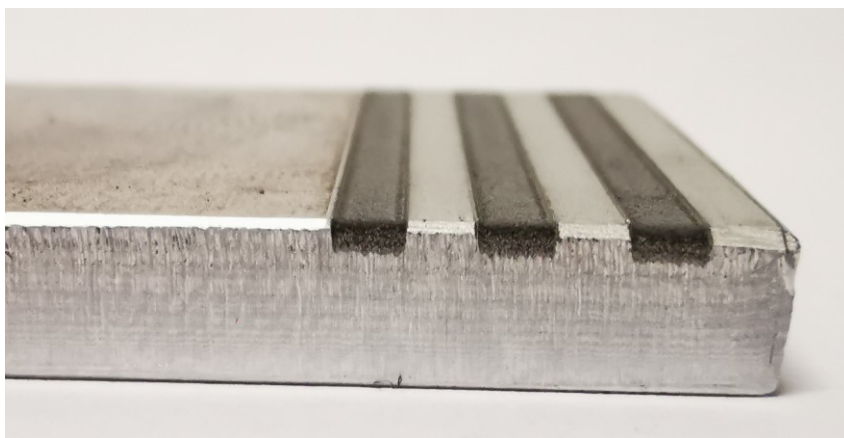
Obr. 44 Metalografický výbrus plochy 3.

1- hloubka 1 (zvětšení 100x), 2- hloubka 2 (zvětšení 100x), 3- hloubka 2 (zvětšení 200x).

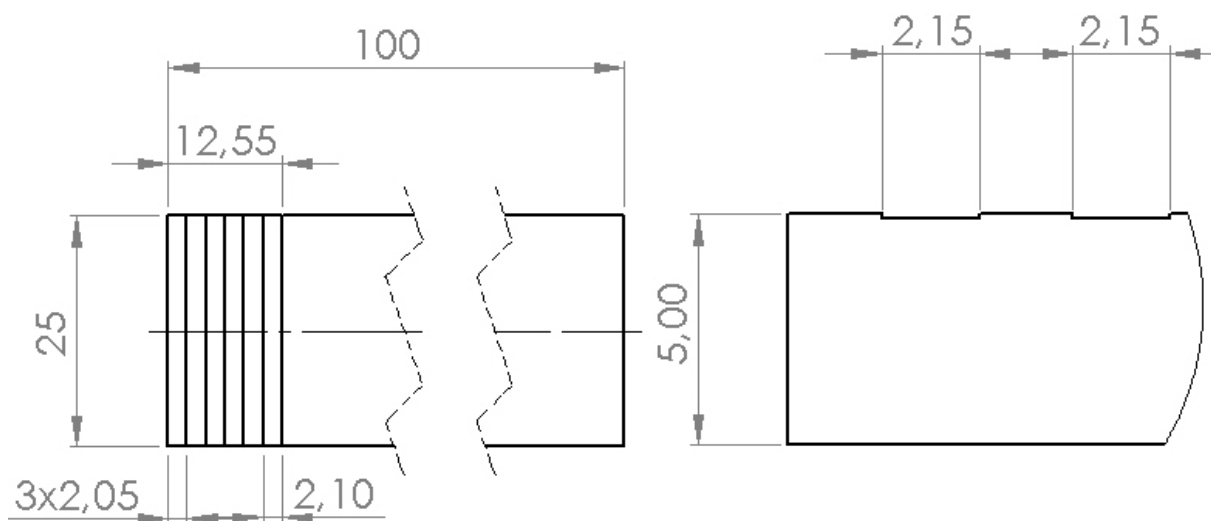
3.1.3 Návrh gravírovaných zámků

Při návrhu zámků bylo dbáno na to, aby tvar byl středově souměrný podle osy na obr. 46, to usnadňuje výrobu těchto zámků, protože není třeba vyrábět horní a spodní stranu zvlášť. Proto bylo rozhodnuto o dvou typech zámků s vyšší a nižší hustotou zaplnění lepené plochy obdélníky (zámky). S hloubkou zámků 0,1 mm vycházející z předchozího metalografického měření.

Typ zámků A je tvořen třemi vystupujícími zámkem o šířce 2,05 mm a třemi drážkami o šířce 2,15/2,1 mm, a to z důvodu, že poslední drážka musela být zkrácena, aby nedocházelo k přilepování testovacího vzorku k vymežovací desce přípravku. Vzorek se zámkem A vidíme na obr. 45 a jeho rozměry vidíme obr. 46. Jak si lze z obrázku povšimnout délka lepeného spoje je 12,55 mm nicméně i tento rozměr splňuje normu ČSN EN 1465

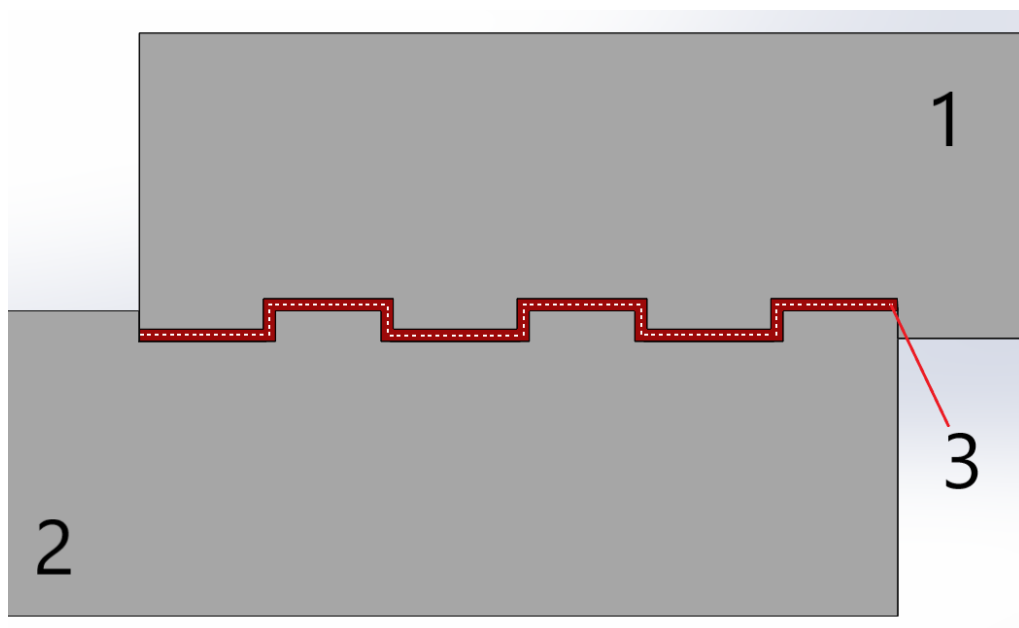


Obr. 45 Vzorek s vygravírovaným zámkem A.



Obr. 46 Rozměry typu zámku A.

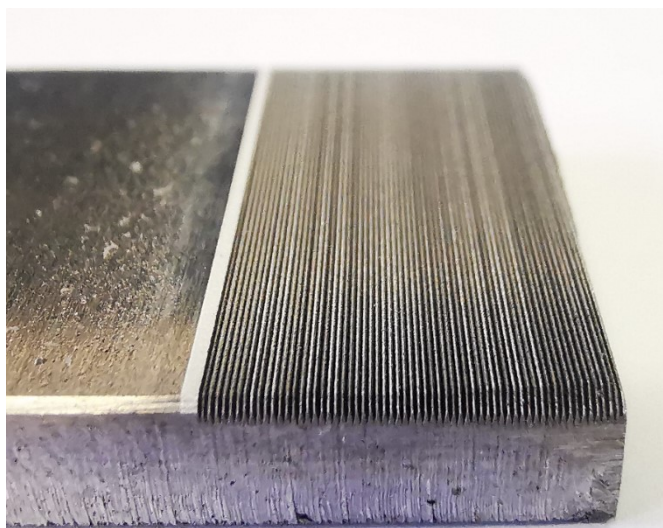
U tohoto typu zámku dochází pouze k mírnému nárustu délky střednice lepeného spoje a to z 12,55 na 13,05 mm. Střední plocha spoje naroste z 313,75 mm² na 326,25 mm². Střednici lepeného spoje můžeme vidět obr. 47.



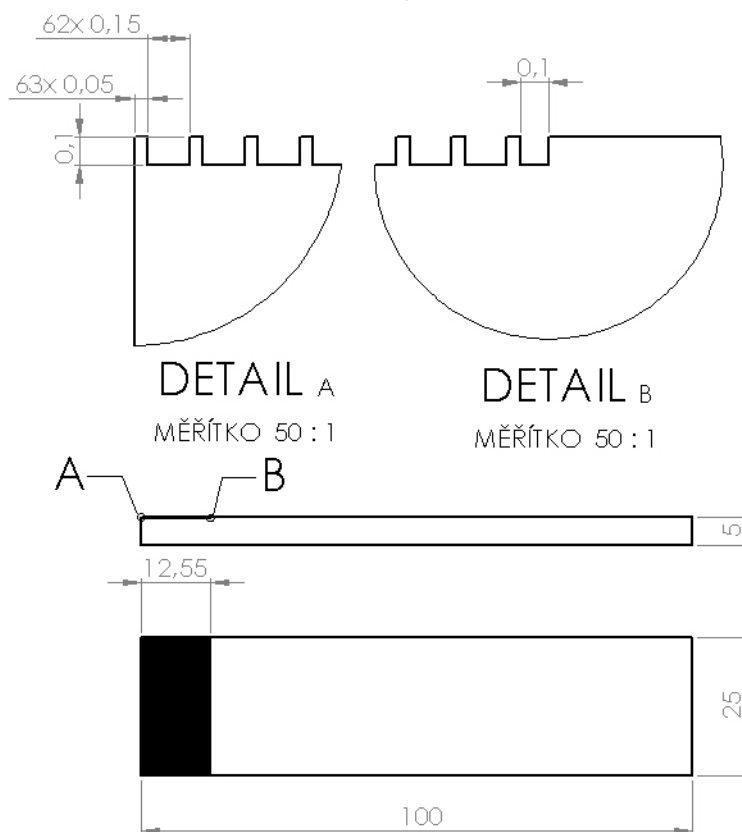
Obr. 47 Vizualizace střednice lepeného spoje.

- ➔ 1 - Horní vzorek
- ➔ 2 – Dolní vzorek
- ➔ 3 – Střednice lepeného spoje

Typ zámku B má ověřit vliv nárůstu lepené plochy na mechanické vlastnosti a zdali dojde k přenesení zatížení spoje na kovové zámky. Typ zámku B je tvořen 63 vystupujícími zámky s šířkou 0,05 mm a 63 drážkami s šířkami 0,15 a 0,1 mm. Drážky jsou o 0,1 mm širší z důvodu, aby i mezi výstupkem a zámkem vznikla spára 0,05 mm. Vzorek se zámkem B vidíme na obr. 48. a jeho rozměry vidíme obr. 49. Taktéž i zde je délka lepeného spoje 12,55 mm. Nicméně střednice lepeného spoje narostla z 12,55 mm na 25,05 mm na téměř dvojnásobek a taktéž plocha lepeného spoje vzrostla z 313,75 mm² na 626,25 mm².



Obr. 48 Vzorek s vygravírovaným zámkem B.



Obr. 49 Rozměry typu zámku B.

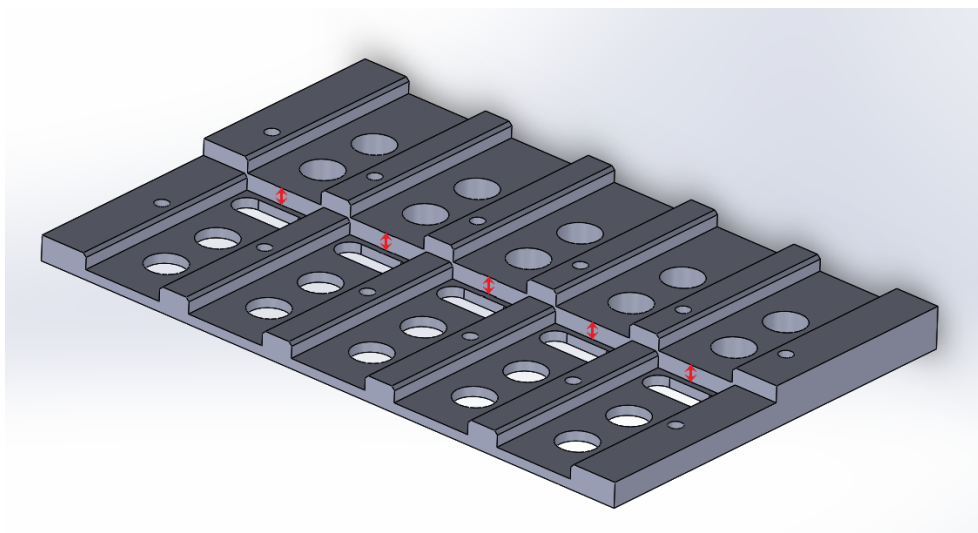
3.1.4 Konstrukce přípravku pro lepení

Při našem experimentu bylo použito lepidlo Loctite EA 9514 a byla použita spára lepidla 0,05 mm. Takto nízká spára lepidla nám umožňuje technický list lepidla a bude použita z důvodu potlačení kohezního porušení. Následně se pevnost lepeného spoje přenesne na adhezi povrchu a tím bude ověřen vliv předchozích povrchových úprav, respektive vygravírovaných zámků na pevnost lepeného spoje. Aby byla zaručena konstantní velikost spáry lepidla, bude potřeba při lepení a následném vytvrzení v peci použít přípravek, který zaručí vzájemnou vzdálenost vzorků na právě 0,05 mm. Můj návrh vycházel z přípravku, který byl použit v minulosti na naší katedře, tento přípravek vidíme na obr. 50.



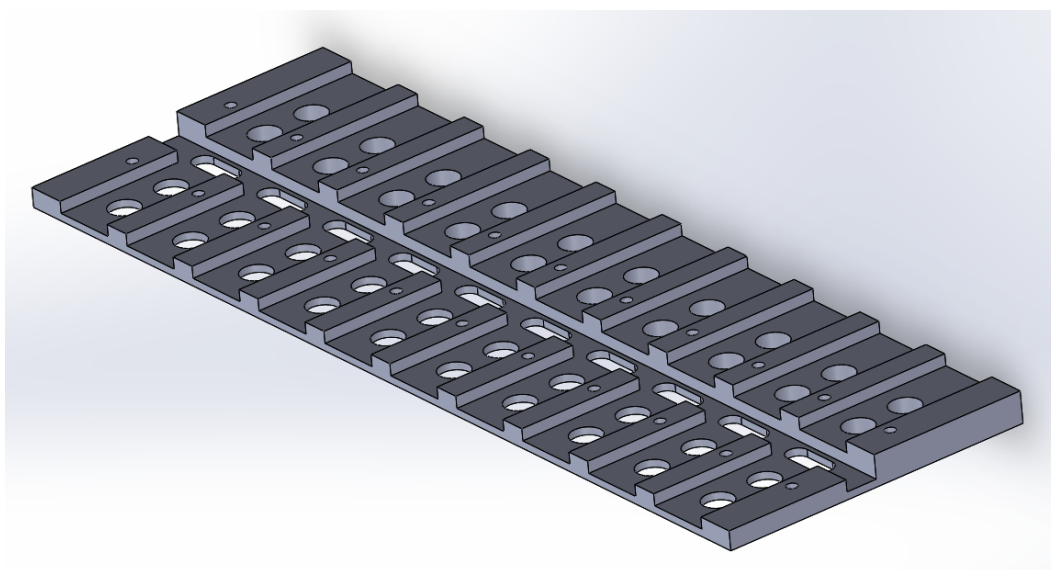
Obr. 50 Starý přípravek pro lepení vzorků.

Tento přípravek disponuje nevýhodami, které byly odstraněny. Hlavní nedostatek tohoto přípravku je materiál, ze kterého je vyroben. Přípravek je vyroben z oceli, která disponuje příliš velkou tepelnou kapacitou, což má za následek dlouhé prohřívání na cílovou teplotu a také dlouhé chladnutí přípravku pro vyjmutí slepených vzorků. Tato skutečnost dramaticky zvyšuje časovou náročnost pro přípravu velkých sad vzorků k trhací zkoušce. Z tohoto důvodu první návrh přípravku počítal s konstrukcí z hliníkové slitiny a s kapacitu na 5 lepených vzorků. Pro zrychlení prohřevu samotných vzorků a zvýšení cirkulace vzduchu v jeho okolí byly v přípravku navrženy dva kruhové otvory o průměru 12 mm pro každý samostatný vzorek a pro každý lepený spoj oválná drážka. Spáru pro lepidlo nám zaručuje schod horního patra pro vzorky, který je vyznačen na obr. 51. Tento schod je o 0,05 mm větší než samotná tloušťka vzorků a tím zajistí spáru pro lepidlo, vizualizaci přípravku vidíme taktéž obr. 51.



Obr. 51 Vizualizace první verze přípravku.

Další nevýhodou minulého přípravku byla jeho kapacita. Minulá konstrukce počítala pouze s pěti vzorky na jedno vytvrzení, což je pro velké sady vzorků velice časově náročné. A proto bylo rozhodnuto o přeměření laboratorní pece určené k našemu experimentu s výsledkem, že lze zde umístit přípravek s kapacitou deseti vzorků, protože keramický podstavec uvnitř pece měl rozměry 390x290 mm. Díky tomuto zjištění došlo k přepracování přípravku a navýšení kapacity na 10 vzorků. Dále byl prvotní návrh přípravku z pohledu výroby zbytečně komplikovaný a chybí zde technologická korekce tvaru pro obrábění. Z těchto důvodů došlo k finální korekci návrhu přípravku. Došlo k odstranění všech zkosení z důvodu zbytečné náročnosti na obrábění a taktéž zde byla přidána korekce tvaru v oblasti spodní hrany vymezovacího schodu, aby fréza měla přístup k těmto místům. Finální návrh přípravku vidíme na obr. 52.



Obr. 52 Finální přípravek s korekcí tvaru pro obrábění.

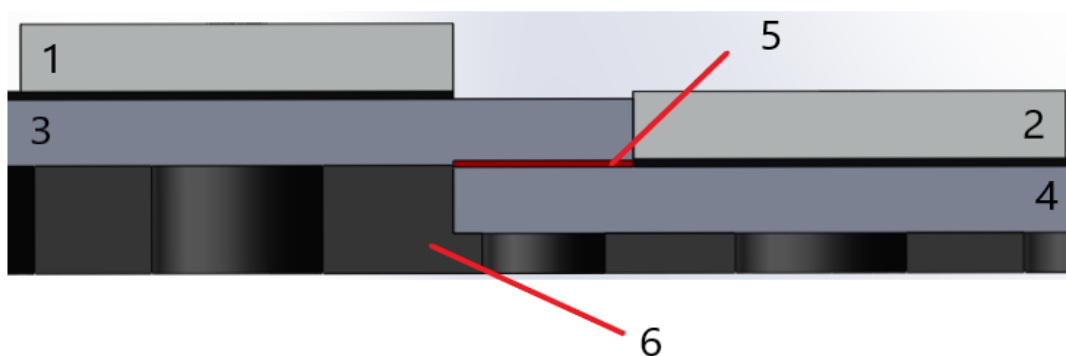
Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC

Nieméně z důvodu gravírovaných zámků budou tyto přípravky vyrobeny dva. Přípravky budou obráběny z polotovaru o rozměrech 375x135x15 mm. Avšak s rozdílnou výškou vymezovacího schodu. První přípravek bude pro vzorky bez gravírovaných zámků s výškou schodu 5,05 mm a výškou přípravku 12,5 mm, druhý přípravek pro vzorky s hloubkou zámku 0,1 mm s výškou schodu 4,95 mm a výškou přípravku 12,4 mm. Na obr. 53 vidíme hotový obrobený přípravek. Kompletní technický výkres přípravku najdeme v příloze včetně technického výkresu přípravku pro gravírované zámků.



Obr. 53 Pohled na celý přípravek.

Samotné vzorky budou v přípravku přidrženy pomocí desky, která bude přišroubovaná k přípravku prostřednictvím 11xM5 šroubů. Abychom zde zaručili stejný tlak působící na všechny vzorky, budou šrouby utaženy pomocí momentového klíče na stejný utahovací moment. Uchycují deska spodních vzorků na obr. 54. deska č. 2 také plní funkci vymezení délky lepeného spoje na 12,5 mm, jak udává norma ČSN. Řez přípravkem a vizualizace lepeného spoje vidíme na obr. 54.

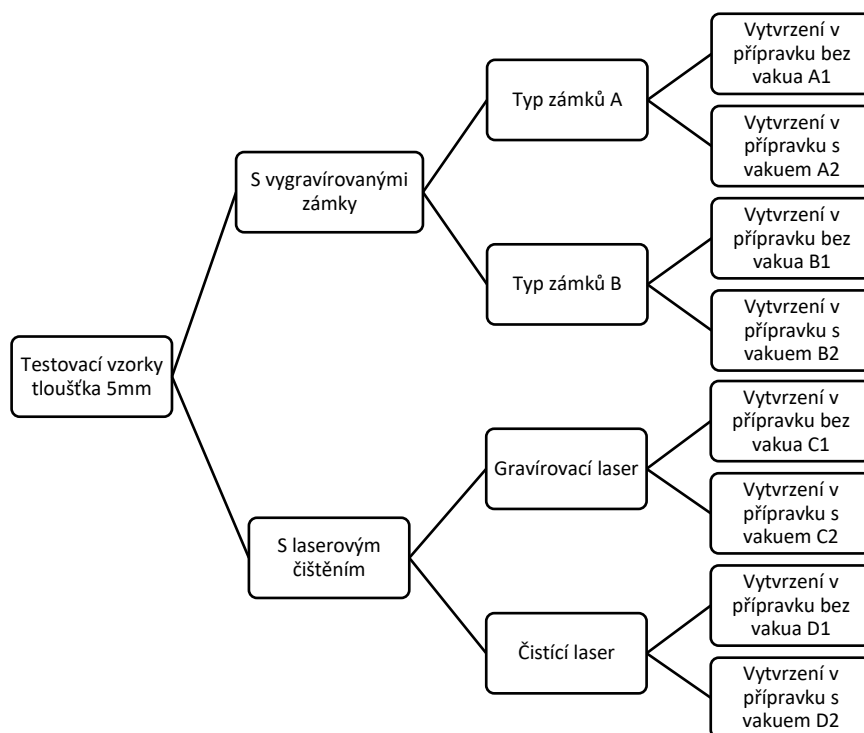


Obr. 54 Model lepeného spoje.

- ➔ 1 – Přidržovací destička
- ➔ 2 – Vymezovací destička
- ➔ 3, 4 – Lepené vzorky
- ➔ 5 – Spára lepidla 0,05 mm
- ➔ 6 – Přípravek s cirkulačními otvory

3.2 Realizace experimentu

Dle dřívější přípravy experimentu byly rozděleny sledované vzorky na kategorie A, B, C a D. Skupina vzorků A a B jsou vzorky s vygravírovaným zámky dle dřívějšího návrhu. Skupina vzorků C a D budou vzorky laserově čištěny, a to buďto pomocí gravírovacího laseru skupina vzorků C nebo pomocí našeho laseru na katedře skupina vzorků D. Nakonec se i tyto skupiny rozdělí podle toho, zda budou vytvrzovat v přípravku s přítlačnou deskou nebo za působení vakua, jež má zajistit konstantní přítlak na vzorky. Skupina vzorků bez vakua jsou označeny 1 vzorky s vytvrzováním za působení vakua 2. Celé toto rozdělení vidíme přehledně na obr. 55. Každá ze skupin bude tvořena 10 vzorky pro následnou tahovou zkoušku.

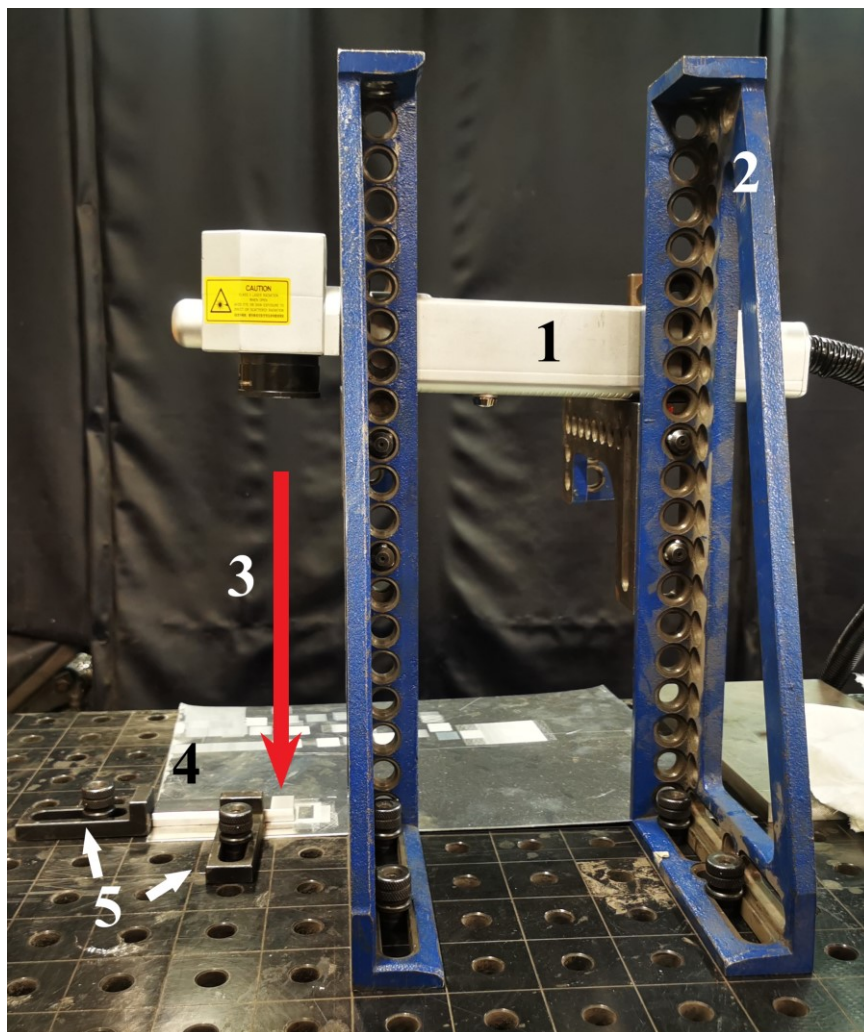


Obr. 55 Rozdělení testovaných skupin vzorků.

Skupina vzorků D byla laserově čištěna pomocí čistícího laseru MRJ-FL-CL120 od firmy MRi-Laser. Byly použity parametry, které vidíme v tab. 13. Tyto parametry již byly ověřeny předchozím výzkumem na katedře materiálů a technologií pro automobily, pomocí technologie recognoil jako vhodné pro očištění povrchu. Celou soustavu, která byla použita pro laserové čištění, vidíme na obr. 56.

Tab. 13 Parametry čistícího laseru vzorků D.

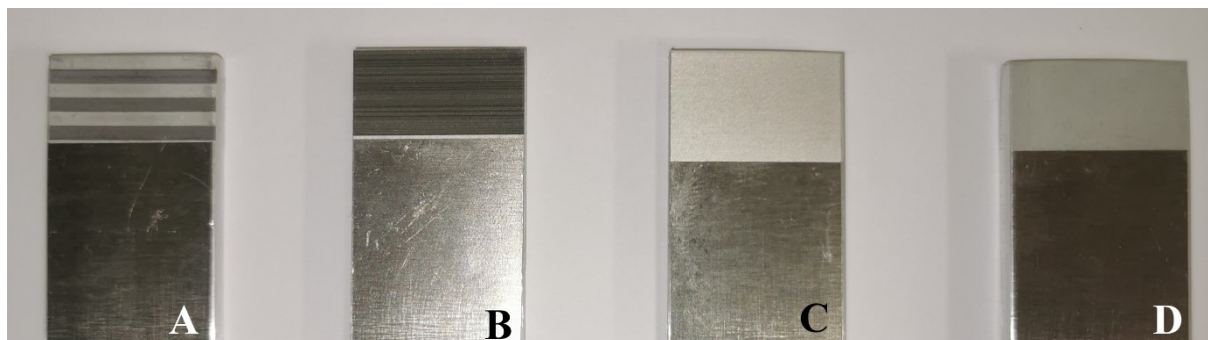
Rychlost paprsku [mm/s]	Délka [mm]	Šířka [mm]	Počet spirál [-]	Frekvence [kHz]	Výkon [%]	Délka impulzu [ns]	Délka laserování [s]
4160	32	20	10	50	30	50	20



- 1- Laser MRJ-FL-CL120
- 2- Stojan
- 3- Směr laseru
- 4- Čištěný vzorek
- 5- Podložky pro ustavení vzorku

Obr. 56 Sestava pro laserové čištění.

Všechny vzorky s jejich povrchovou úpravou vidíme na obr. 57.

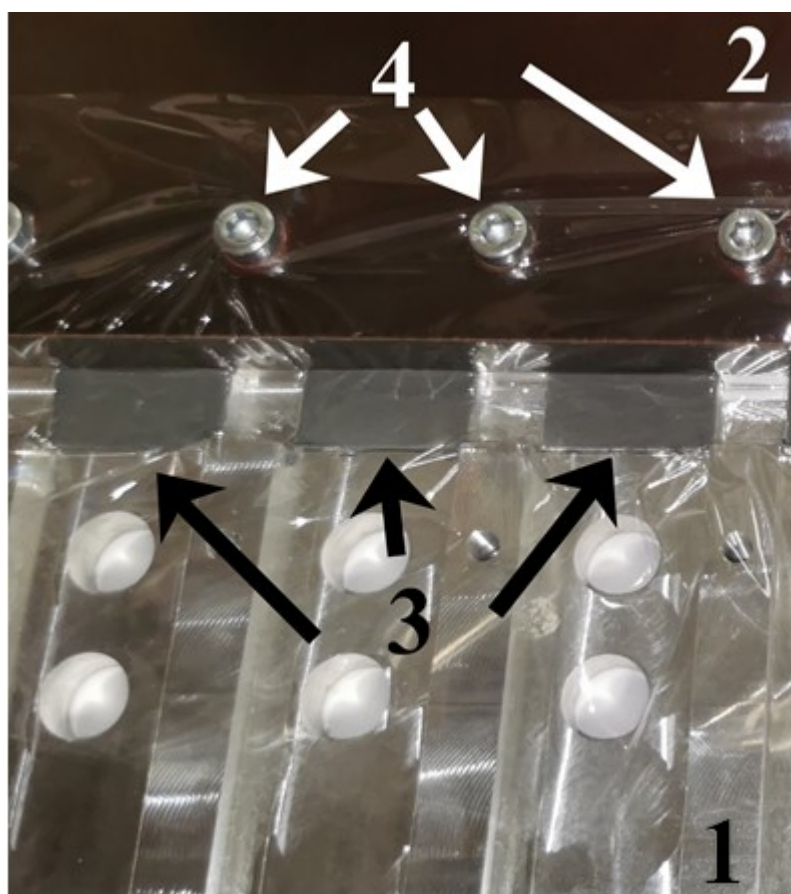


Obr. 57 Ukázka všech povrchových úprav.

- ➔ A – Vygravírovaný zámek A
- ➔ B – Vygravírovaný zámek B
- ➔ C – Čištění pomocí gravírovacího laseru
- ➔ D – Čištění pomocí průmyslového laseru (MRJ-FL-CL120)

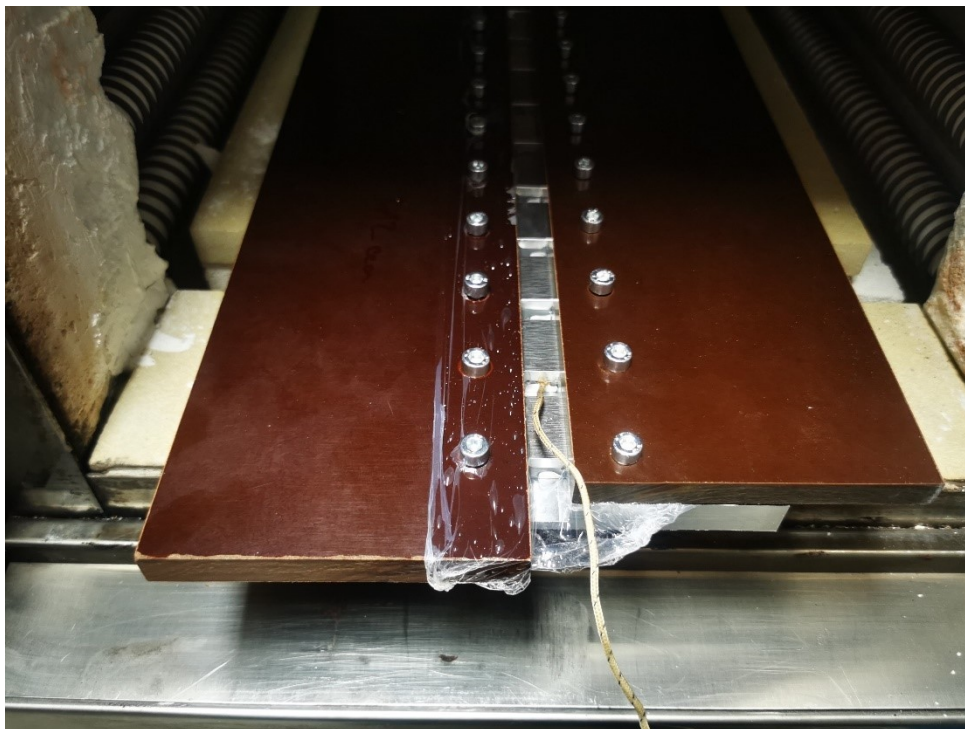
3.2.1. Příprava vzorků pro tahovou zkoušku

Jako první krok bylo nanesení lepidla Loctite EA 9514 a rovnoměrné rozetření po lepené oblasti (25x12,5 mm). Poté byla na přípravek v místech lepeného spoje položena separační folie, aby nedocházelo k přímému kontaktu přetoků lepidla s přípravkem. Následně byly vzorky uloženy do přípravku a zajištěny vymežovací deskou taktéž potaženou separační fólií. Upevnění vymežovací desky zajišťovalo jedenáct M5x16 šroubů dotažených pomocí momentového klíče na 8 N*m, aby bylo zaručeno stejného přitlaku na každý ze vzorků. Následující kroky vidíme na obr. 58. Postup se opakoval i pro horní sadu vzorků. Přípravek osazený vzorky a vložený do pece vidíme na obr. 59.



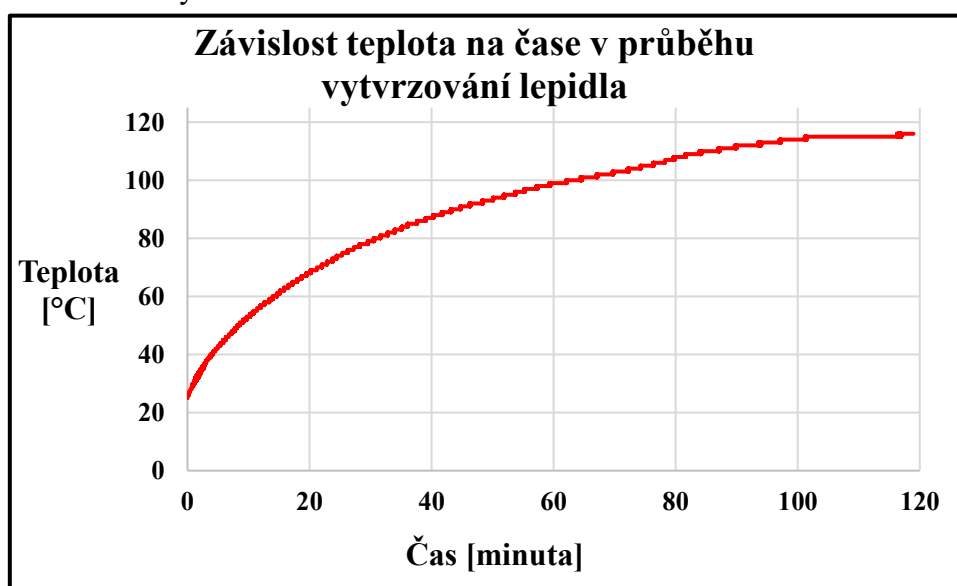
- 1 - Přípravek
- 2 - Vymežovací deska
- 3 - Usazené vzorky
s naneseným lepidlem
- 4 - Šroub M5x16 utažený na
8 N*m

Obr. 58 Příprava vzorků v přípravku.



Obr. 59 Přípravek vložený do pece.

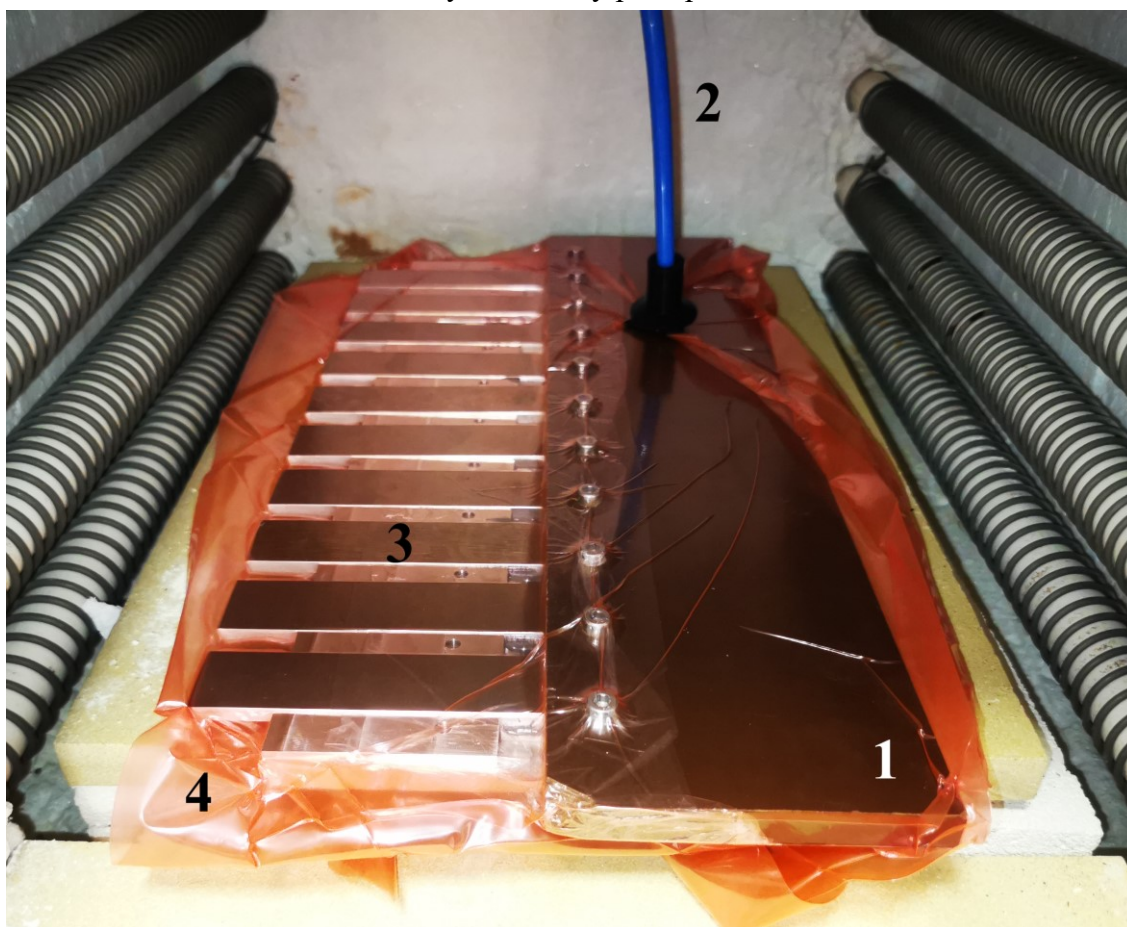
Na obrázku si lze povšimnout termočlánek pomocí, kterého byla měřena teplota a to z důvodu, aby byla zjištěna doba, po kterou se přípravek nahřívá a za jak dlouho dosáhne teplota v lepeném spoji 120 °C. Při dosáhnutí teploty 120 °C následovala výdrž na této teplotě po dobu 35 minut. Posledním krokem bylo vychladnutí přípravku za pokojové teploty, vyjmutí slepených vzorků a jejich označení pro budoucí rozeznání. Na obr. 60 vidíme graf z měření a průběh teploty v závislosti na čase. Celkový čas vytvrzování lepidla v peci při 120 °C byl stanoven na 3 hodiny.



Obr. 60 Závislost teploty na čase v průběhu vytvrzování lepidla.

3.2.2 Příprava vzorků pro tahovou zkoušku s použitím vakua

Usazení vzorků a nanášení lepidla probíhá obdobně jako bez užití vakua. Pouze se vynechává horní přidržovací deska, jejíž funkci právě nahrazuje vakuum. Následně se přípravek vloží do vakuové folie v našem případě folie VB160. Folie VB160 je vakuová fólie, která disponuje vysokou pružností a odolností proti propíchnutí, zároveň je odolná až do 160 °C. Po vložení přípravku byla fólie na jednom místě propíchnuta, aby byl zde vyveden odvod vzduchu pro vývěvu. Následně byla fólie na obou koncích svařena vzduchotěsným spojem. Posledním krokem bylo vložení přípravku do pece a zapojení vývěvy k odvodu vzduchu z vakuové folie. Výše zmíněný postup vidíme na obr. 61.

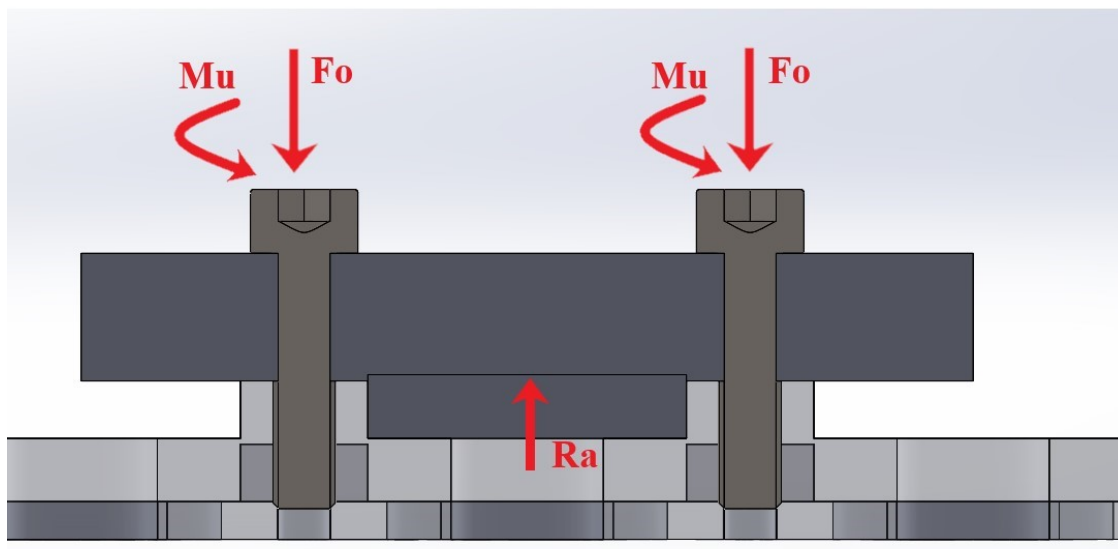


Obr. 61 Přípravek ve vakuové fólii VB160.

- ➔ 1 – Osazený přípravek bez horní přidržovací desky
- ➔ 2 – Připojení k vývěvě vzduchu
- ➔ 3 – Horní lepené vzorky
- ➔ 4 – Vakuová folie VB160

3.2.3 Porovnání přítláčných sil

Přítláčné síly v přípravku jsou vyvolány utahovacím momentem 8 N*m. Tento utahovací moment lze přepočítat na osovou sílu. Za předpokladu, že přítláčná deska je absolutně tuhá reakce vzorku R_a , bude dvojnásobkem osové síly šroubu F_o . Nicméně tento způsob výpočtu je pouze přibližný. Rozbor sil vidíme na obr. 62.



Obr. 62 Rozbor sil v přípravku.

Šroub M5

- ➔ Utahovací moment $M_u = 8 \text{ N}\cdot\text{m}$
- ➔ Stoupání závitu $P = 0,8$
- ➔ Střední průměr závitu $d_2 = 4,48 \text{ mm}$
- ➔ Součinitel smykového tření ve stykových plochách $f = 0,15$
- ➔ Vrcholový úhel závitu $\alpha = 60^\circ$

$$R_a = 2F_o$$

$$M_u = F_o * \tan(\gamma + \varphi') * \frac{d_2}{2} \rightarrow F_o = \frac{2M_u}{d_2 * \tan(\gamma + \varphi')}$$

$$\text{Úhel stoupání } \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi * d_2}\right) = 3,25325^\circ$$

$$\text{Třecí úhel } \varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}}\right) = 9,82642^\circ$$

$$F_o = 15,372 \text{ N} \rightarrow R_a = 30,744 \text{ N}$$

Zkouška smykové pevnosti s podporou metody DIC

Při použití technologie přitlaku pomocí vakua, je přitlačná síla vytvářena atmosférickým tlakem 101,325 kPa. Pomocí barometru na použité vývěvě bylo odečteno 98% vakuum. Z toho vyplývá, že rozdíl tlaku byl roven 99 298,5 Pa. Následná přitlačná síla lze vypočítat vynásobením plochy lepeného spoje, rozdílem tlaku mezi vakuovou fólií a okolím. V našem případě je plocha lepeného spoje 12,5x25 mm, což je rovno ploše 312,5 mm². Samotnou jednotku pascal lze přepsat na N/m² a z toho získáváme vztah:

$$\Delta p = p_n * 0,98 = 99298,5 \text{ Pa}$$

$$S = 12,5 * 25 = 312,5 \text{ mm}^2 = 0,0003125 \text{ m}^2$$

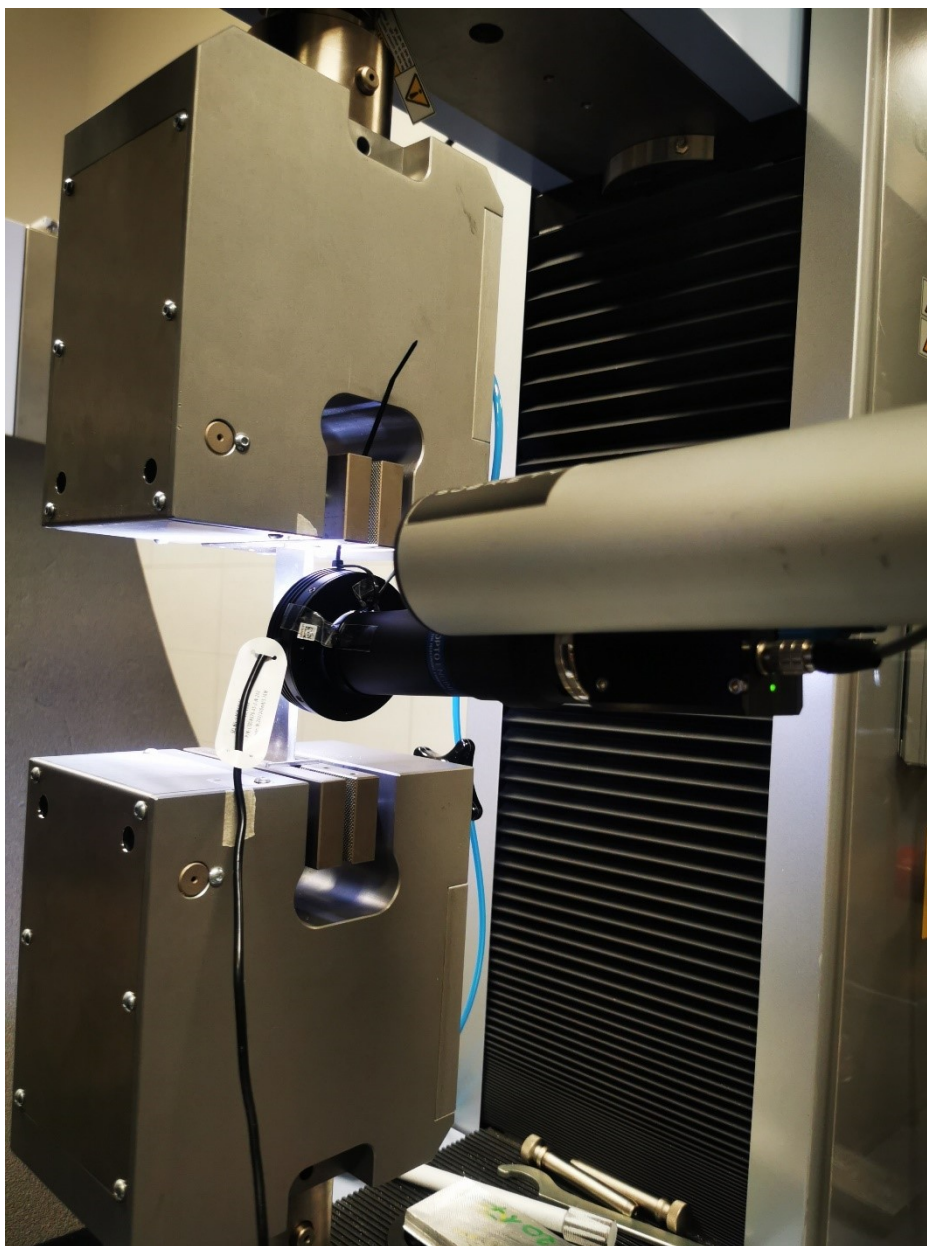
$$F = \Delta p * S$$

$$\mathbf{F = 31,03 \text{ N}}$$

Dle výpočtu vychází, že s použitím vakua dostáváme mírně vyšší přitlačnou sílu, navíc také tato síla je rovnoměrně distribuovaná po lepeném spoji. Nicméně zásadním faktorem na účinnosti tohoto přitlaku je dokonalé přilnutí vakuové fólie na lepený spoj. V praxi se ukazuje, že použitá vakuová folie v oblastech vymezovací podložky, má problémy s přilnutím a k tak silnému přitlaku nedochází.

3.3 Průběh měření

Zkouška smykové pevnosti probíhala na katedře materiálů a technologií pro automobily. Samotná zkouška probíhala na trhačím stroji Shimadzu AG-50kN Xplus s rychlostí posuvu 3 mm/min, do roztrhnutí testovaných vzorků. Z této zkoušky bylo určeno maximální napětí ve spoji. Tato zkouška byla taktéž zaznamenávána pomocí digitálního korelátoru Mercury RT s telecentrickým objektivem jak vidíme na obr. 63. Pomocí digitální korelace obrazu bylo ověřováno, zdali dochází k rotaci vzorků a ke změně stavu napjatosti v průběhu tahové zkoušky.

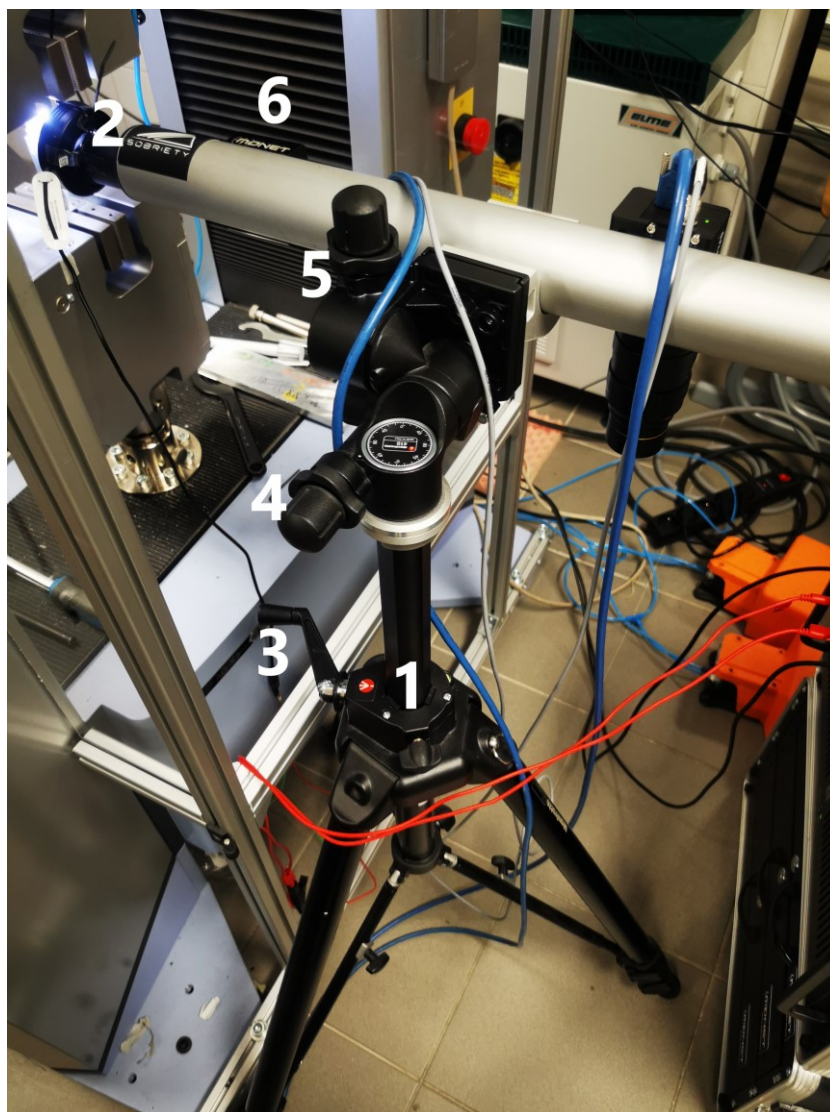


Obr. 63 Ukázka digitální korelace.

3.3.1 Nastavení měřících přístrojů při trhací zkoušce

Před samotnou zkouškou je nutné seřídit trhací čelisti. Jako první byla seřízena horizontální vzdálenost mezi čelistmi tak, aby byla využita celá plocha čelistí na uchycení testovaného vzorku a nedocházelo k prokluzu mezi čelistmi a vzorkem. V našem případě byly čelisti seřízeny na vzdálenost 107,5 mm. Druhým krokem bylo seřízení vertikální vzdálenosti, aby bylo kompenzováno přesazení testovaného vzorku a při stlačení čelistí, zůstal vzorek v rovině. V našem případě bylo odsazení spodní čelisti 12,6 mm a horní 7,6 mm.

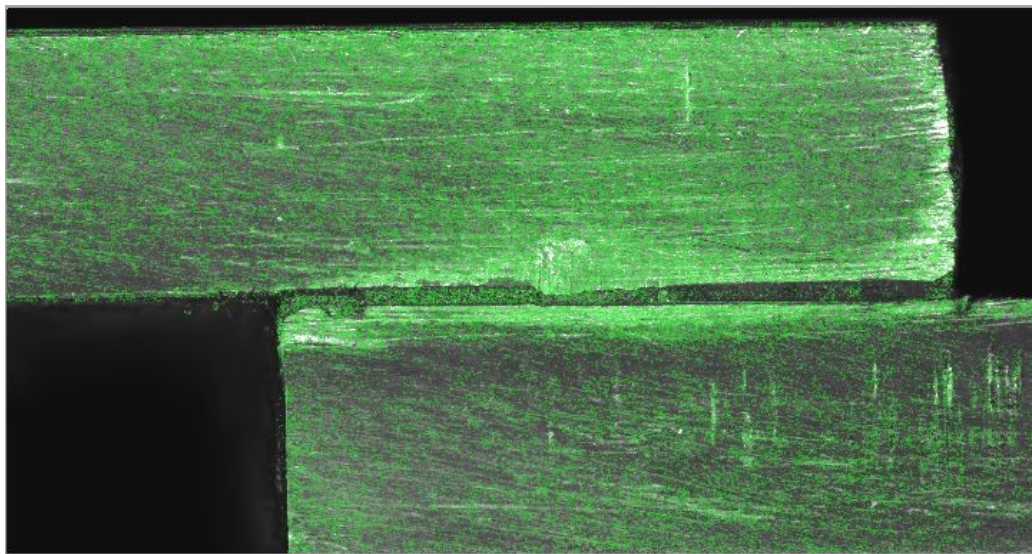
Pro správnou funkci digitálního korelátoru je nutno zajistit dostatek světla dopadajícího na zkoumanou součást. A proto byl použit přídatný zdroj světla umístěný na telecentrickém objektivu. Následně pomocí manuální korekce polohy byl objektiv zaostřen na místo lepeného spoje, jak vidíme na obr. 64.



- 1 – Stojan kamery
- 2 – Telecentrický objektiv s přídatným zdrojem světla
- 3 – Korekce nahoru/dolů
- 4 – Otáčení kolem osy stojanu
- 5 – Korekce zaostření dopředu/dozadu
- 6 – Šrouby uchycující kameru ke stojanu

Obr. 64 Sestava pro digitální korelaci obrazu.

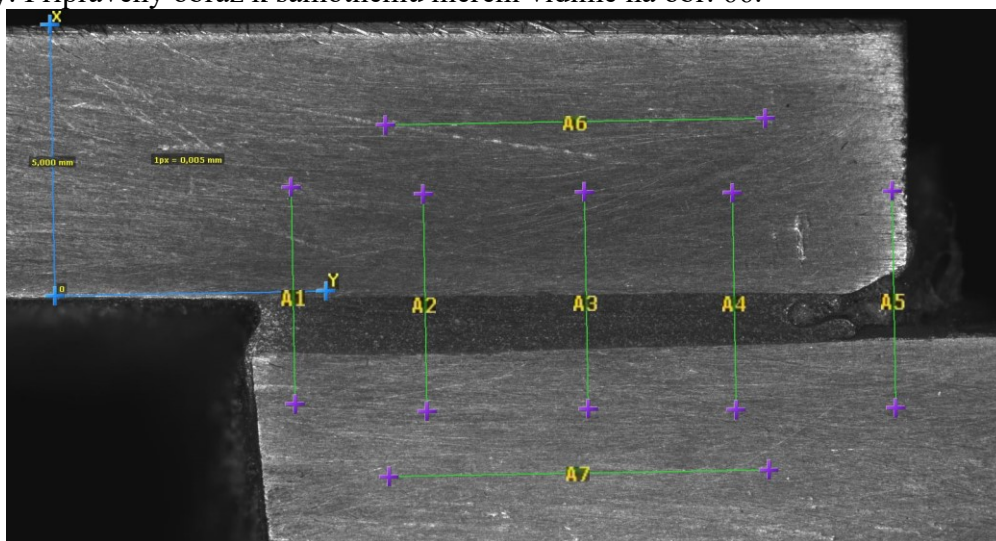
Ke správnému zostření na oblast lepeného spoje sloužil nástroj v programu MercuryRT Focus tool, jak vidíme na obr. 65.



Obr. 65 DIC Focus tool.

Na obrázku vidíme správně zaostřený obraz potřebný k samotnému měření. Pro měření pomocí digitální korelace obrazu je třeba zajistit nesourodý povrch. Toho docílíme například broušením jako v našem případě nebo lze využít kontrastního spreje. Tyto metody upraví povrch tak, aby došlo ke správnému rozpoznání povrchu při digitální korelaci obrazu.

Po úspěšném zaměření byly v programu navoleny úsečky A1 až A7, pomocí kterých byl vyšetřován průběh tahové zkoušky. Úsečky A1 až A5 byly umístěny kolmo přes lepený spoj a srovnány s osou x. Pomocí těchto úseček bylo zjišťováno, zdali a kde dochází k odlupování. Úsečky A6 a A7 byly umístěny do oblasti základního materiálu a se směrem rovnoběžným vůči lepenému spoji. Tyto úsečky sloužili pro indikaci rotace zkušebních vzorků v průběhu tahové zkoušky. Připravený obraz k samotnému měření vidíme na obr. 66.



Obr. 66 Obraz připraven k měření při DIC.

4. Vyhodnocení a závěr

Hlavním parametrem hodnocení bylo maximální dosažené napětí v lepeném spoji. Nicméně také byl hodnocen charakter porušení lepeného spoje, dosažená tloušťka lepidla pomocí přípravku či vakua a drsnost lepených ploch. Následně byl pomocí digitální korelace obrazu zmapován průběh tahové zkoušky. Pro vzorky s vygravírovanými zámkami A a B nebyla použita digitální korelace obrazu z důvodů výsledků předešlých měření. Tato měření nepotvrdila zvýšení mechanických vlastností, dále zde byla zjištěna nevhodná mikrostruktura lepených ploch a nedošlo ke správnému spasování vzorků. Proto vyšetřování průběhu tahové zkoušky by zde nevedlo k žádným relevantním závěrům.

4.1 Vyhodnocení vygravírovaných zámků typu A

Bylo otestováno vždy 10 vzorků z každé skupiny, jak vytvrzených v přípravku, tak ve vakuu. V tab. 14 a tab. 15 vidíme kompletní výsledky trhacích zkoušek skupiny vzorků A.

Tab. 14 Výsledky tahové zkoušky vzorků se zámkem A + přípravek (A1).

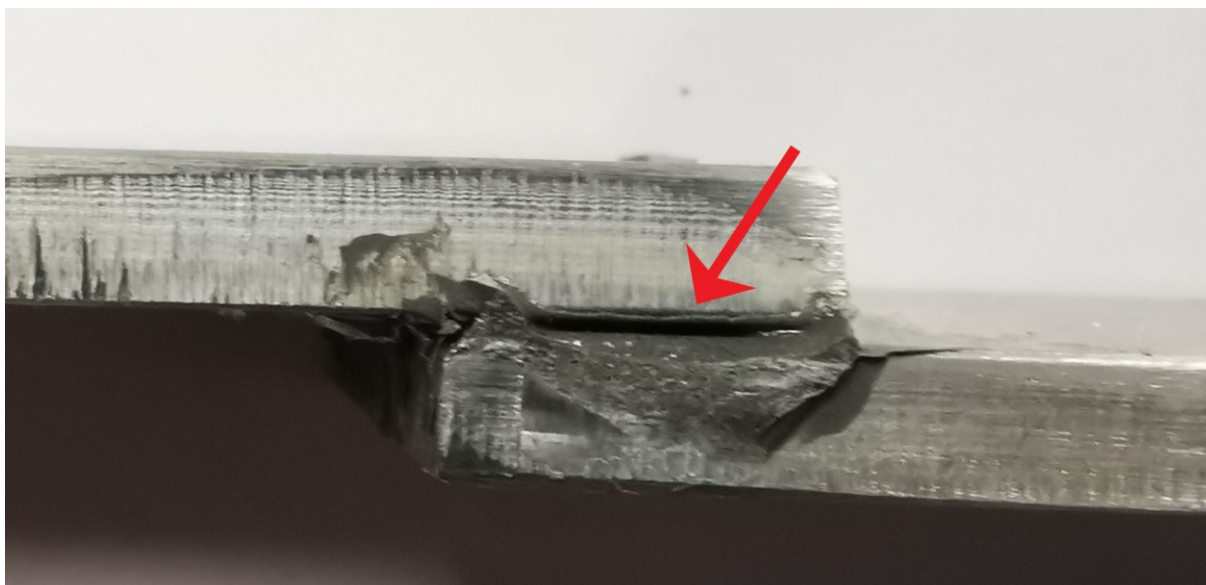
Typ zámku	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Zámek_A1	A1.1	7529	1,178	23,997
Zámek_A1	A1.2	7938,9	1,576	25,303
Zámek_A1	A1.3	7783,91	1,380	24,809
Zámek_A1	A1.4	7938,28	1,713	25,301
Zámek_A1	A1.5	7805,23	1,416	24,877
Zámek_A1	A1.6	7979,23	1,000	25,432
Zámek_A1	A1.7	7433,08	0,808	23,691
Zámek_A1	A1.8	7897,69	0,91	25,172
Zámek_A1	A1.9	7729,7	0,982	24,636
Zámek_A1	A1.10	8373,98	1,026	26,690
Aritmetický průměr		7840,9	1,12	24,991

Vyhodnocení a závěr

Tab. 15 Výsledky tahové zkoušky vzorků se zámkem A + vakuum (A2).

Typ zámku	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Zámek_A2	A2.1	7855,59	1,606	25,038
Zámek_A2	A2.2	7755,43	1,604	24,719
Zámek_A2	A2.3	7270,52	1,520	23,173
Zámek_A2	A2.4	2823,21	1,955	8,998
Zámek_A2	A2.5	7938,93	1,908	25,303
Zámek_A2	A2.6	6698,13	1,560	21,349
Zámek_A2	A2.7	7826,11	1,917	24,944
Zámek_A2	A2.8	6854,55	0,867	21,847
Zámek_A2	A2.9	7872,93	0,981	25,093
Zámek_A2	A2.10	7799,55	0,988	24,859
Aritmetický průměr		7069,495	1,491	24,733

Ze skupiny A2 byly vyřazeny vzorky A2.4, A2.6 a A2.8 a to z důvodu nedostatečného přilnutí lepidla k oběma plochám lepeného spoje, tento jev vidíme na obr. 67.

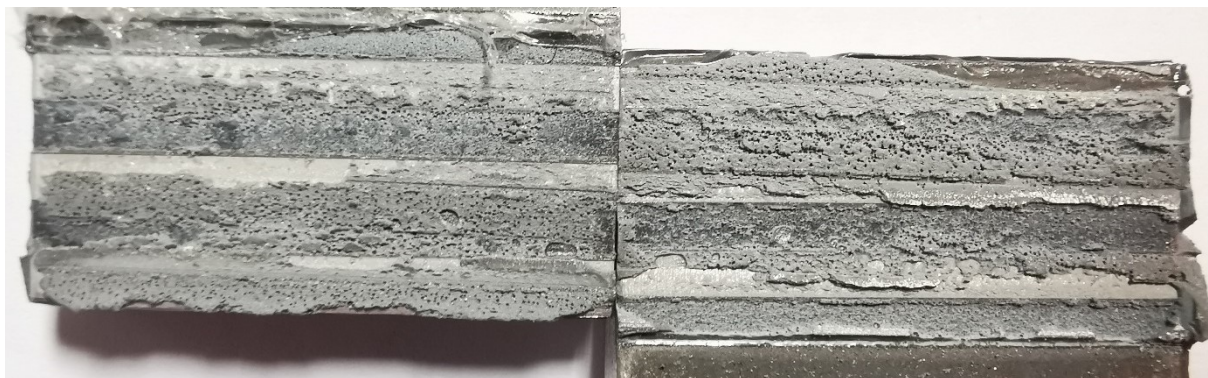


Obr. 67 Ukázka defektu nepřilnutí lepidla.

Jak vidíme na obrázku lepidlo nepřilnulo k oběma plochám spoje, a to z důvodu nedostatečného přitlaku v průběhu vytvrzování lepidla, následkem byl znehodnocený vzorek pro měření.

Vyhodnocení a závěr

U vygravírovaných zámku typu A, docházelo ke kombinovanému porušení lepeného spoje bez ohledu, zdali vytvrzovali v přípravku či ve vakuu, jak vidíme na obr. 68.



Obr. 68 Kombinované porušení vygravírovaných zámků A.

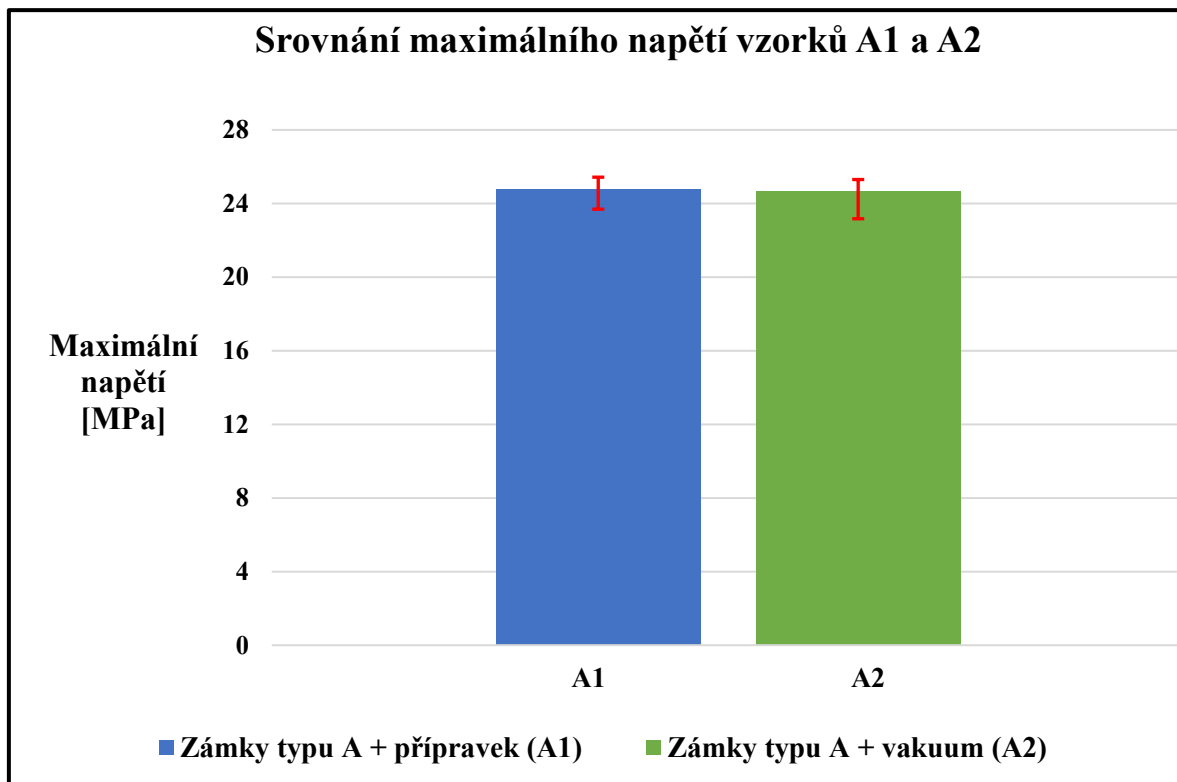
Na obrázku vidíme pravidelně se střídat adhezní a kohézní porušení. Z toho lze usuzovat, že na vystupujících plochách zámků byl nedostatek adheze, zatímco v drážkách nikoliv. Proto byla změřena drsnost obou povrchů jak vystupujících zámků, tak drážek, výsledky měření vidíme v tab. 16.

Tab. 16 Měření drsnosti vygravírovaných zámků A.

Plocha	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
Vystupující zámek	3,259	3,985	17,094
Drážka	3,882	4,742	20,88

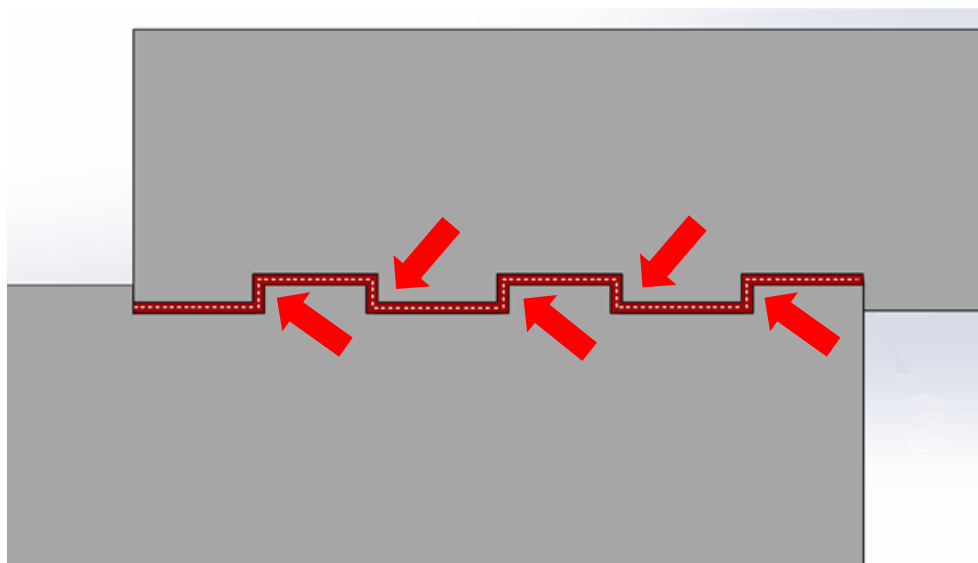
- ➔ Ra – Střední aritmetická úchylka profilu
- ➔ Rq – Aritmetická úchylka profilu 10 náhodných bodů
- ➔ Rz – Maximální výška nerovnosti profilu

Z měření drsnosti vychází, že oba povrchy mají podobnou drsnost, což nevysvětluje nedostatek adheze na vystupujících zámcích. Nicméně z technologie výroby těchto zámků víme, že prvním krokem výroby zámků bylo čištění gravírovacím laserem a až následně se přešlo ke gravírování samotných drážek. Dalším měřením bylo zjištěno, že drsnost vyčištěné plochy pomocí gravírovacího laseru je Ra – 0,739 μm . Proto je zde podezření, že došlo ke kontaminaci povrchu cizími částicemi či došlo k oxidaci, která nepříznivě ovlivnila adhezní vlastnosti povrchu vystupujících zámků. Výsledné porovnání maximálních napětí vidíme na obr. 69.



Obr. 69 Porovnání mezi pevností skupin A1 a A2.

Vygravírované zámky dosahovaly průměrného maximálního napětí okolo 25 MPa. V parametru maximálního napětí se vzorky vytvrzené v přípravku od vzorků vytvrzených ve vakuu významně neliší. Vygravírované zámky dosahují nižších maximálních napětí než vzorky s čistěnými plochami lepeného spoje. U vygravírovaných zámku A, také docházelo ke špatnému spasování zámků a to z důvodu návrhu těchto zámků, který dbal na souměrnou spáru lepidla 0,05 mm, a to i na bocích zámku, jak vidíme na obr. 70.

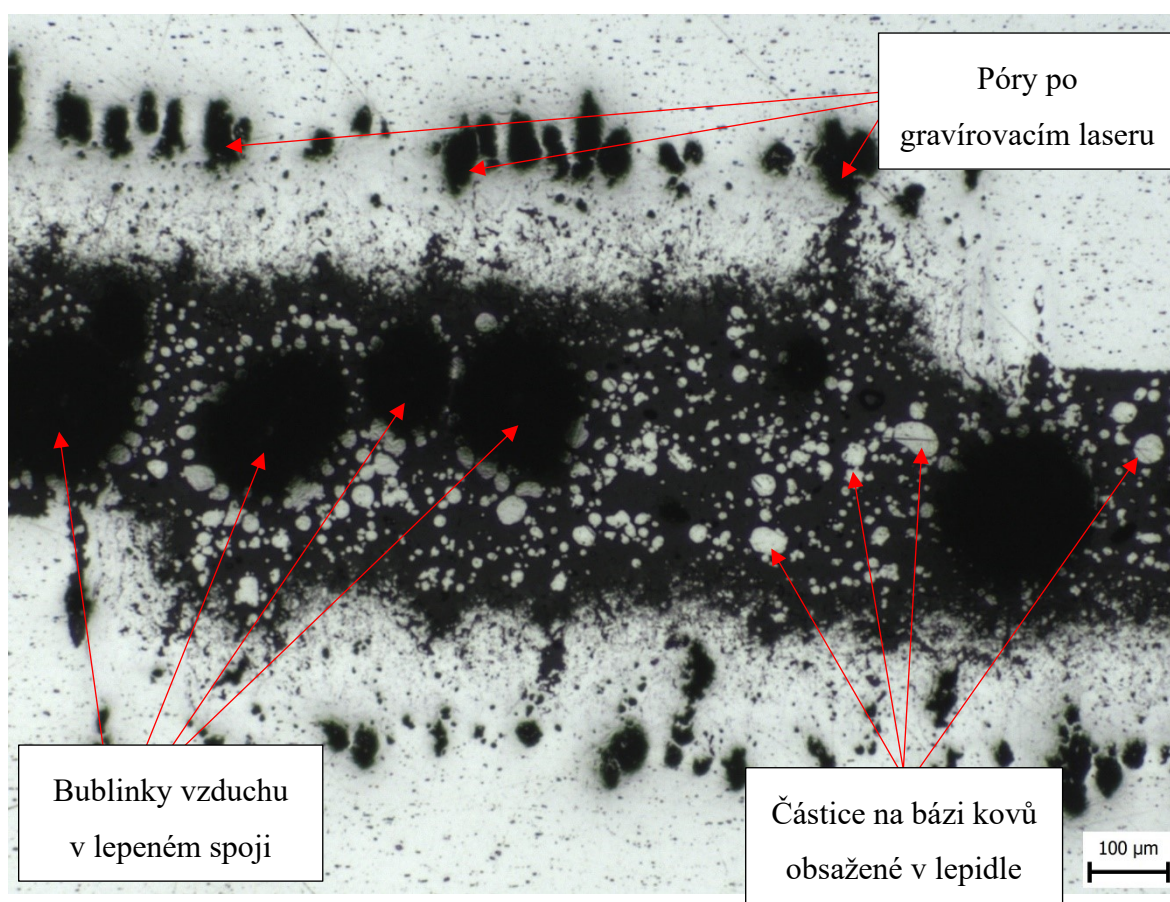


Obr. 70 Ukázka na boky zámků vygravírovaných zámků.

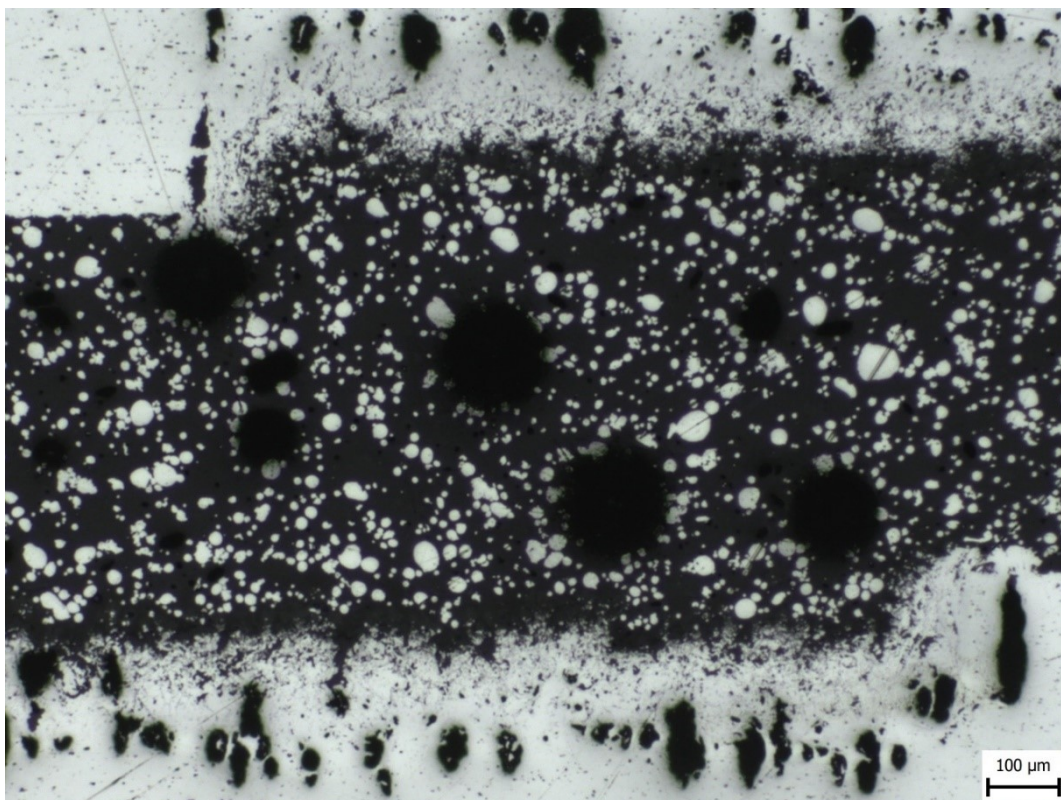
Vyhodnocení a závěr

Z tohoto důvodu bylo dbáno na vysokou přesnost při výrobě těchto zámků, nicméně se nepodařilo vhodně optimalizovat nájezdový úhel laseru a výsledné zámky byly vygravírovány mírně pod úhlem. Následkem toho bylo, že zámky do sebe správně nezapadly a vznikala příliš velká spára lepidla.

Druhým důvodem byla samotná mikrostruktura povrchu po gravírovacím laseru. Při prvním zkoumání této struktury byly pozorovány vzniklé póry, u kterých byl předpoklad, že dojde k jejich zatečení lepidlem. Avšak k tomu ději nedošlo, jak vidíme na obr. 71 a obr. 72, naopak uvízlý vzduch v těchto pórech po zahřátí na 120 °C při vytvrzování lepidla expandoval do lepeného spoje za vzniku mikrobublinek v lepeném spoji a to nepříznivě ovlivnilo celistvost lepeného spoje.



Obr. 71 Mikrostruktura lepeného spoje vygravírovaných zámku A + přípravek (A1).



Obr. 72 Mikrostruktura lepeného spoje vygravírovaných zámku A + vakuum (A2).

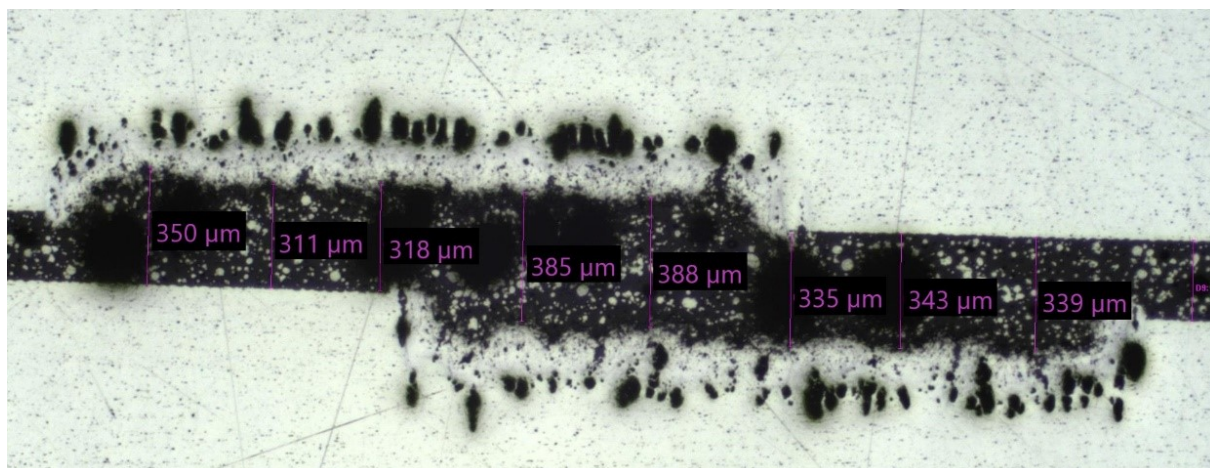
Měření tloušťky spáry lepidla také ukázalo, že se nepodařilo dodržet spáru lepidla 0,05 mm ani u jedné ze skupin. Dokonce u vzorků vytvrzených s přtlakem pomocí vakua byla spára lepidla téměř dvojnásobná oproti vzorkům vytvrzených v přípravku. Naměřené hodnoty tloušťky spáry lepidla vidíme v tab. 17 a následné vyhodnocení těchto dat vidíme v tab. 18. Ukázku z měření vidíme na obr. 73 a obr. 74.

Tab. 17 Hodnoty měření spáry lepidla A1/A2.

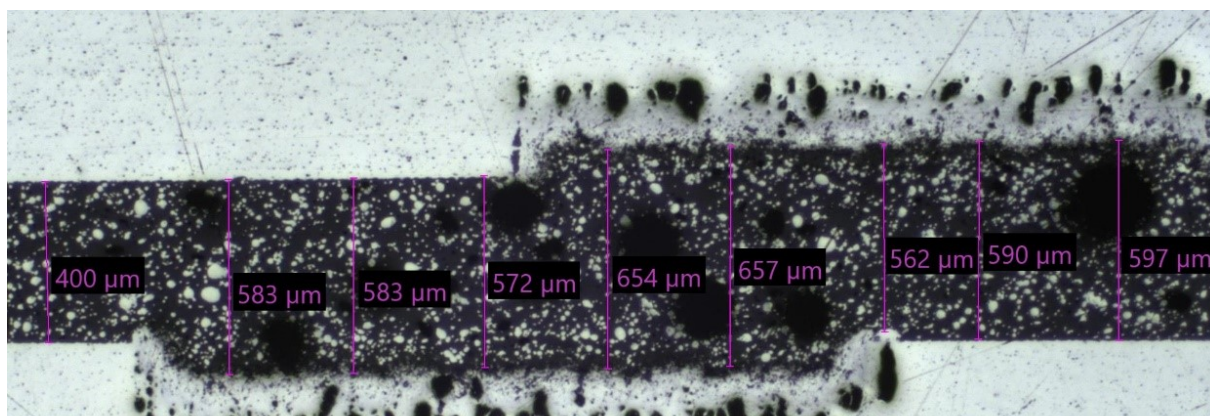
Číslo měření	A1 [μm]	A2 [μm]
Měření č.1	349,98	480,68
Měření č.2	311,03	583,05
Měření č.3	318,04	583,04
Měření č.4	385,22	572,45
Měření č.5	388,71	653,71
Měření č.6	335,71	657,25
Měření č.7	342,77	561,85
Měření č.8	339,24	590,12
Měření č.9	243,84	597,17

Tab. 18 Vyhodnocení měření A1/A2.

Označení vzorku	A1 [μm]	A2 [μm]
Střední hodnota	334,95	586,59
Chyba střední hodnoty	14,38	17,35
Medián	339,24	583,05
Směr. odchylka	43,13	52,05
Rozptyl výběru	1860,28	2709,57
Minimum	243,84	480,68
Maximum	388,71	657,25
Počet	9	9



Obr. 73 Měření tloušťky spáry lepidla vzorků s vygravírovanými zámkem A + přípravek (A1).



Obr. 74 Měření tloušťky spáry lepidla vzorků s vygravírovanými zámkem A + vakuum (A2).

4.2 Vyhodnocení vygravírovaných zámků typu B

Bylo otestováno vždy 10 vzorků z každé skupiny, jak vytvrzených v přípravku, tak ve vakuu. V tab. 19 a tab. 20 vidíme kompletní výsledky trhacích zkoušek skupiny vzorků B.

Tab. 19 Výsledky trhací zkoušky vzorků se zámkem B + přípravek (B1).

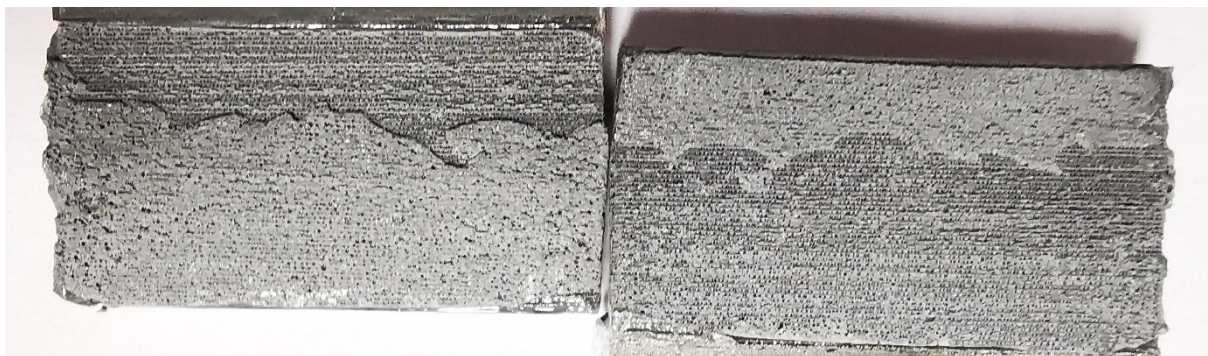
Typ zámku	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Zámek_B1	B1.1	7058,54	1,746	22,497
Zámek_B1	B1.2	7803,1	0,969	24,87
Zámek_B1	B1.3	7645,13	0,868	24,367
Zámek_B1	B1.4	7823,71	0,857	24,936
Zámek_B1	B1.5	7851,08	0,933	25,023
Zámek_B1	B1.6	7753,63	0,940	24,713
Zámek_B1	B1.7	7897,49	0,986	25,171
Zámek_B1	B1.8	7905,07	0,976	25,195
Zámek_B1	B1.9	7488,69	0,884	23,868
Zámek_B1	B1.10	7975,79	1,01	25,421
Aritmetický průměr		7690,383	1,043	24,841

Tab. 20 Výsledky trhací zkoušky vzorků se zámkem B + vakuum (B2).

Typ zámku	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Zámek_B2	B2.1	5877,741	0,576	18,734
Zámek_B2	B2.2	6794,747	0,685	21,657
Zámek_B2	B2.3	7095,257	0,762	22,614
Zámek_B2	B2.4	6798,411	0,701	21,668
Zámek_B2	B2.5	7163,087	0,83	22,831
Zámek_B2	B2.6	6093,892	0,597	19,423
Zámek_B2	B2.7	6979,529	0,792	22,246
Zámek_B2	B2.8	7178,11	0,932	22,878
Zámek_B2	B2.9	6952,04	0,720	22,158
Zámek_B2	B2.10	7144,53	0,818	22,771
Aritmetický průměr		6686,095	0,740	22,353

Vzorky B1.1, B2.1 a B2.6 byly vyřazeny z vyhodnocení ze stejných důvodů jako u skupiny A a to z nedostatečného přilnutí lepidla k lepeným plochám spoje.

U vygravírovaných vzorků se zámkem B docházelo ke kohéznímu lomu taktéž bez ohledu na technologii vytvrzení lepidla, jako vidíme na obr. 75.



Obr. 75 Kohézní porušení lepeného spoje vygravírovaných zámků B.

Zde již vidíme stejný trend jako u vzorků se zámkem A a to vznik velkého počtu mikrobublinek v lepeném spoji. Tento trend měl za následek velké oslabení celistvosti lepidla, a proto docházelo ke kohéznímu porušení.

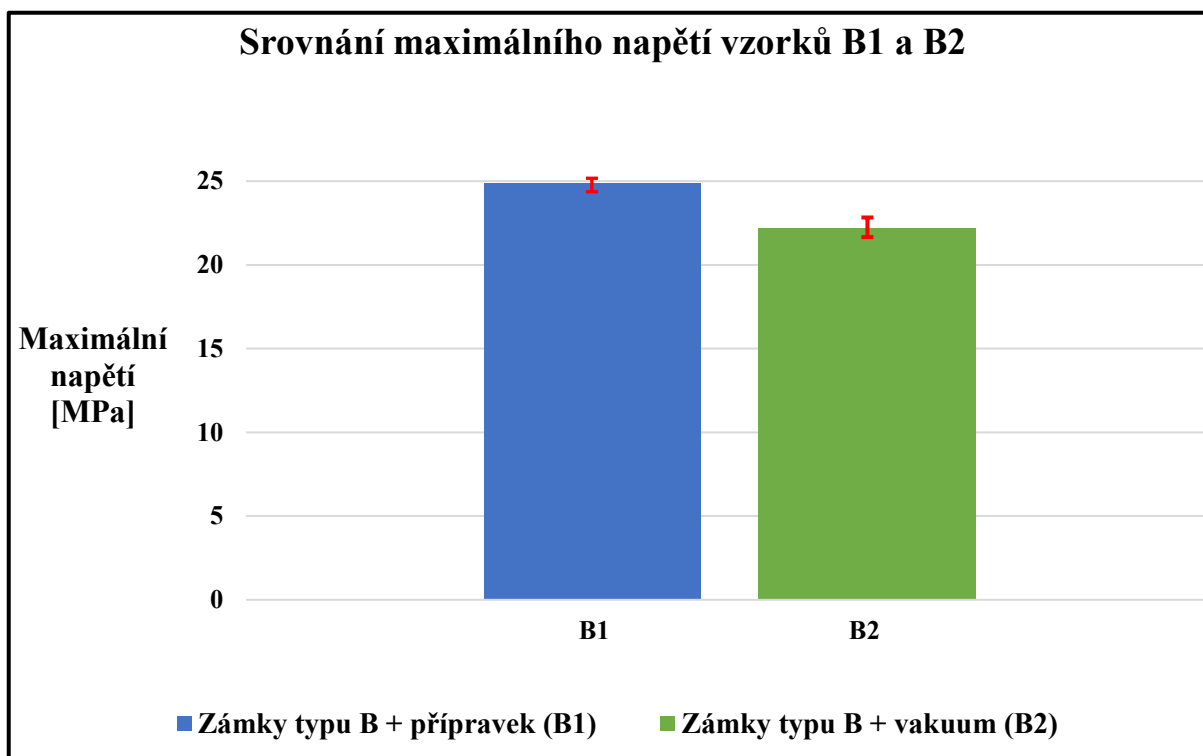
Pomocí naší technologie nebylo možné změřit drsnost povrchu v samotných drážkách. Nicméně tyto zámkové drážky byly vygravírovány stejnou technologií a stejným postupem jako vzorky s vygravírovanými zámkem typu A. Proto lze očekávat, že drsnost povrchu v samotných drážkách bude podobná jako u vzorků A. Dále byla změřena drsnost ve směru zatížení a výsledky vidíme v tab. 21.

Tab. 21 Měření drsnosti vygravírovaných zámků B.

Plocha	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
Vystupující zámek (A)	3,259	3,985	17,094
Drážka (A)	3,882	4,742	20,88
Drsnost ve směru namáhání (B)	4,882	6,51	20,63

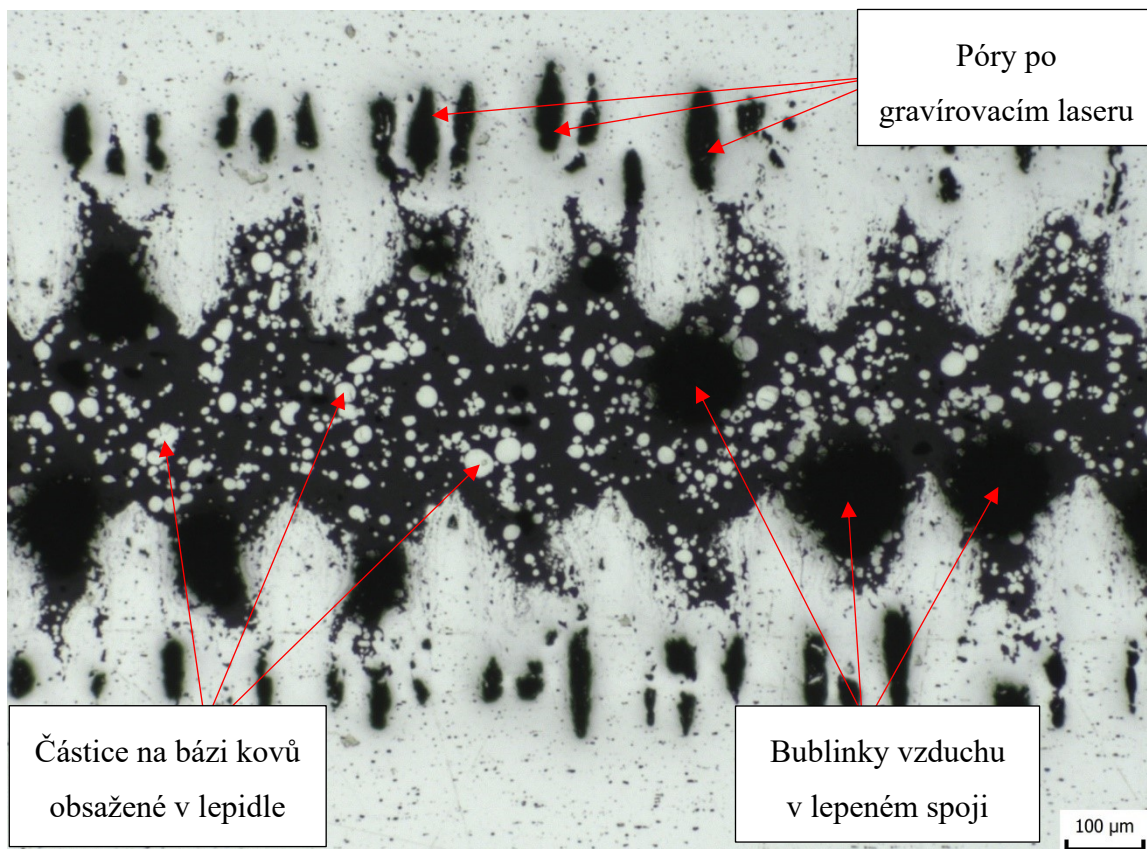
- ➔ Ra – Střední aritmetická úchylka profilu
- ➔ Rq – Aritmetická úchylka profilu 10 náhodných bodů
- ➔ Rz – Maximální výška nerovnosti profilu

Oslabení spáry lepidla mikrobublinkami a nedostatečné zatečení lepidla se nepříznivě odrazilo v maximální dosažených napětí obou pozorovaných skupin. Srovnání skupin B1 a B2 vidíme na obr. 76.

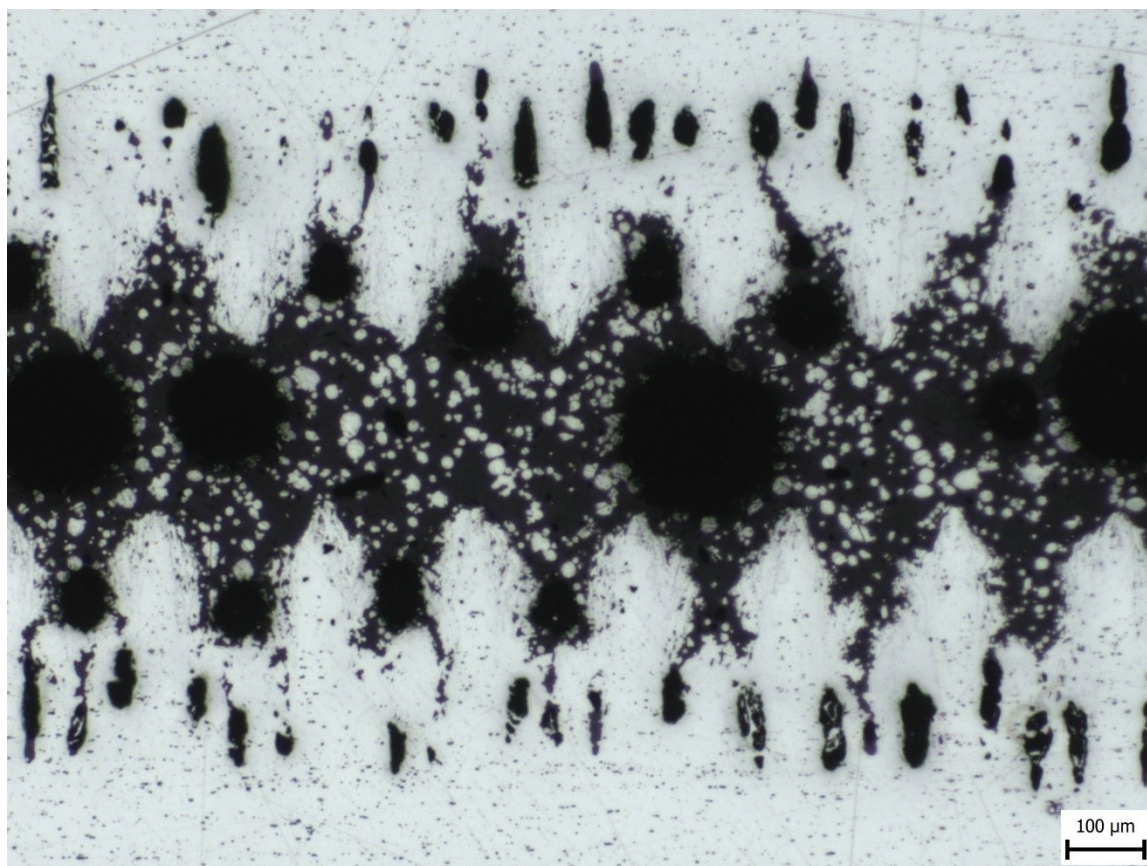


Obr. 76 Porovnání maximálního napětí skupin B1 a B2.

Skupina vzorků vytvrzených v přípravku dosahovala maximálního napětí okolo 25 MPa srovnatelného napětí jako u vzorků s vygravírovanými zámky typu A. Avšak vzorky vytvrzené ve vakuu dosahovaly pouze maximálních napětí okolo 22 MPa. Tyto vzorky disponovaly větší spárou lepidla, která byla velice oslabená mikrobublinkami, a proto jejich maximální dosažená napětí jsou nižší. Tento jev byl ověřen pomocí metalografického výbrusu. Mikrostruktury lepených spojů vygravírovaných zámků B vidíme na obr. 77 a obr. 78.



Obr. 77 Mikrostruktura lepeného spoje vygravírovaných zámku B + přípravek (B1).



Obr. 78 Mikrostruktura lepeného spoje vygravírovaných zámku B + vakuum (B2).

Vyhodnocení a závěr

Lze si povšimnout, že u této skupiny (B1 a B2) nebylo dosaženo dostatečné přitlačné síly, protože zámky při pozorování mikrostruktury jsou správně spasované, avšak je mezi nimi nadbytek lepidla. Znova se zde potvrdil trend větší spáry lepidla u vzorků skupiny B vytvrzené ve vakuu. Naměřené hodnoty tloušťky spáry lepidla vidíme v tab. 22 a následné vyhodnocení těchto dat vidíme v tab. 23.

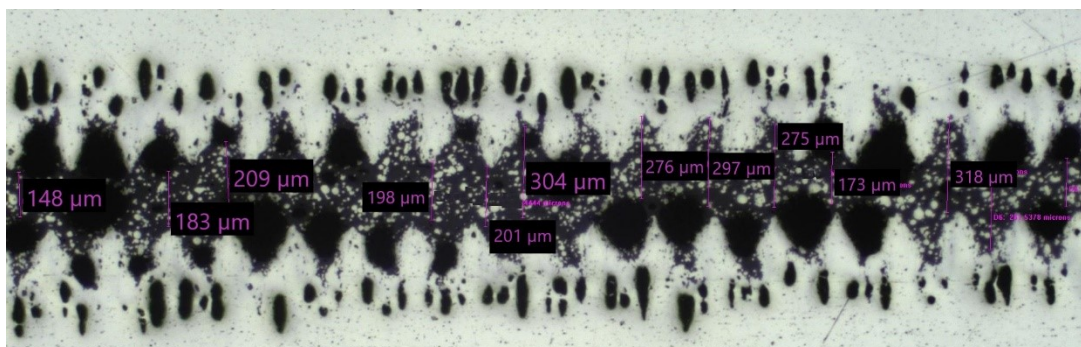
Tab. 22 Hodnoty měření spáry lepidla B1/B2.

Číslo měření	B1 [μm]	B2 [μm]
Měření č.1	148,45	362,19
Měření č.2	183,75	286,24
Měření č.3	208,75	268,64
Měření č.4	160,79	204,95
Měření č.5	261,54	302,13
Měření č.6	318,10	263,26
Měření č.7	173,18	234,99
Měření č.8	275,64	
Měření č.9	296,84	
Měření č.10	275,62	
Měření č.11	303,97	
Měření č.12	201,44	
Měření č.13	197,91	

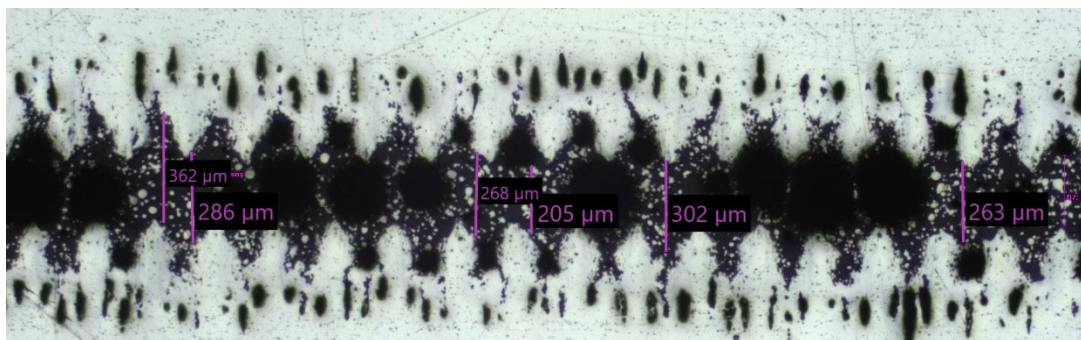
Tab. 23 Vyhodnocení skupin B1/B2.

Označení vzorku	B1 [μm]	B2 [μm]
Střední hodnota	231,23	274,63
Chyba střední hodnoty	16,40	18,99
Medián	208,75	268,64
Směr. odchylka	59,12	50,25
Rozptyl výběru	3495,41	2525,00
Minimum	148,45	204,95
Maximum	318,10	362,19
Počet	13	7

Ukázku z měření vidíme na obr. 79 a obr. 80.



Obr. 79 Měření tloušťky spáry lepidla vzorků s vygravírovanými zámky B + přípravek (B1).



Obr. 80 Měření tloušťky spáry lepidla vzorků s vygravírovanými zámky B + vakuum (B2).

4.3 Vyhodnocení skupiny C čištěné gravírovacím laserem

Bylo otestováno vždy 10 vzorků z každé skupiny, jak vytvrzených v přípravku, tak ve vakuu. V tab. 24 a tab. 25 vidíme kompletní výsledky trhacích zkoušek skupiny vzorků C.

Tab. 24 Výsledky trhací zkoušky vzorků čištěných pomocí gravírovacího laseru C + přípravek (C1).

Typ čištění	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Gravirčištění_C1	C1.1	8324,97	1,103	26,64
Gravirčištění_C1	C1.2	8499,94	1,341	27,2
Gravirčištění_C1	C1.3	7979,93	1,120	25,536
Gravirčištění_C1	C1.4	8586,48	1,435	27,477
Gravirčištění_C1	C1.5	8189,96	1,291	26,208
Gravirčištění_C1	C1.6	8643,86	1,433	27,66
Gravirčištění_C1	C1.7	8264,18	1,318	26,445
Gravirčištění_C1	C1.8	8640,42	1,031	27,65
Gravirčištění_C1	C1.9	8612,44	1,016	27,56
Gravirčištění_C1	C1.10	8741,48	1,047	27,973
Aritmetický průměr		8448,376	1,214	27,035

Tab. 25 Výsledky trhací zkoušky vzorků čištěných pomocí gravírovacího laseru C + vakuum (C2).

Typ čištění	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Gravirčištění_C2	C2.1	7759,2	1,357	24,829
Gravirčištění_C2	C2.2	8629,69	1,539	27,615
Gravirčištění_C2	C2.3	8445,24	1,503	27,025
Gravirčištění_C2	C2.4	8488,04	1,374	27,162
Gravirčištění_C2	C2.5	8485,77	1,647	27,154
Gravirčištění_C2	C2.6	8549,36	1,478	27,358
Gravirčištění_C2	C2.7	8469,51	1,5	27,102
Gravirčištění_C2	C2.8	8340,1	1,059	26,688
Gravirčištění_C2	C2.9	7788,66	0,999	24,924
Gravirčištění_C2	C2.10	7639,65	1,047	24,447
Aritmetický průměr		8315,113	1,349	26,608

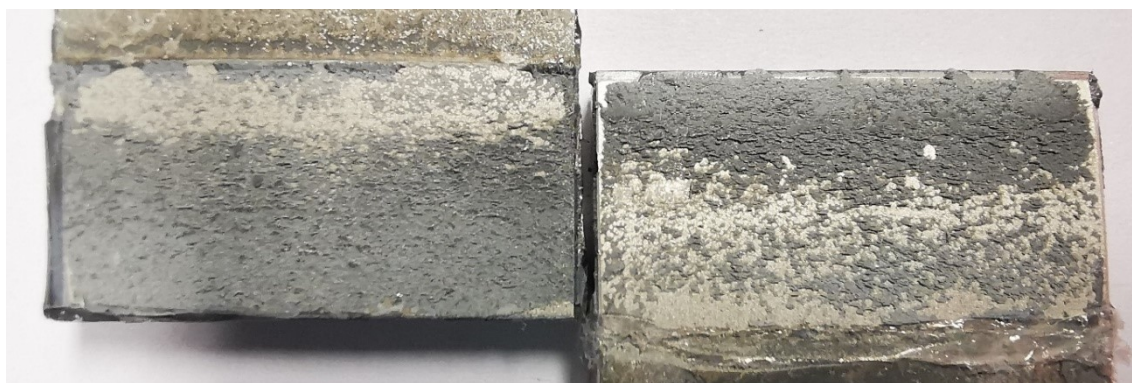
Vzorek C2.1 byl vyřazen z důvodu nedostatečného přilnutí lepidla k lepeným plochám.

U vzorků čištěných pomocí gravírovacího laseru docházelo ke dvěma typům porušení. Nejčastěji docházelo k adheznímu porušení obr. 81.



Obr. 81 Ukázka adhezního porušení.

Avšak také docházelo ke kombinovanému porušení s převahou adhezního charakteru obr. 82.



Obr. 82 Ukázka kombinovaného porušení.

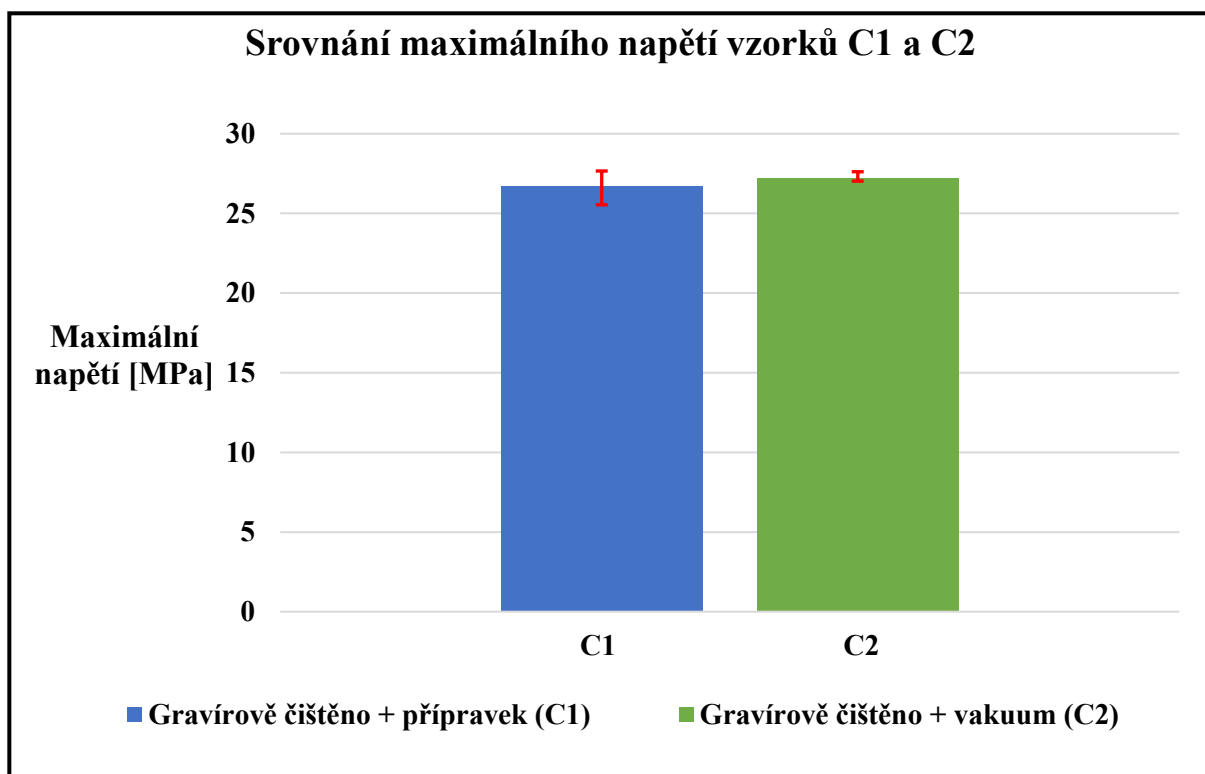
Na prvním obrázku vidíme čisté adhezní porušení. Nicméně zde je důležité si povšimnout směru tohoto porušení a to, že lom jde vždy od čelní plochy ke středu spoje. Na druhém obrázku vidíme kombinované porušení s převahou adhezního charakteru se stejným trendem a to, že lom jde vždy od čelní plochy ke středu spoje. Tento jev naznačuje rotaci vzorku a změnu stavu napjatosti z jednoosé na vícesou napjatost. Tento jev u předchozích sad vzorků z povahy porušení nebyl takto patrný. I u této sady vzorků proběhlo měření drsnosti. Výsledky měření vidíme v tab. 26.

Tab. 26 Měření drsnosti čištěné plochy pomocí gravírovacího laseru.

Plocha	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
Čištění pomocí gravírovacího laseru	0,739	0,934	4,846

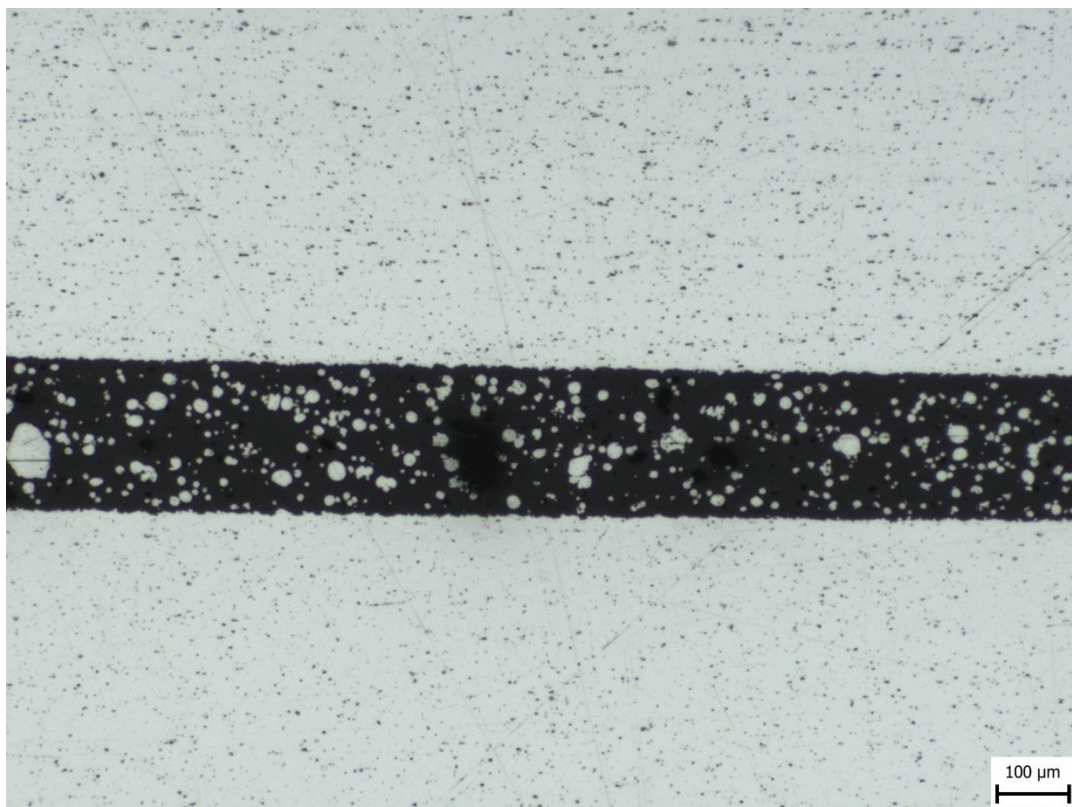
- ➔ Ra – Střední aritmetická úchylka profilu
- ➔ Rq – Aritmetická úchylka profilu 10 náhodných bodů
- ➔ Rz – Maximální výška nerovnosti profilu

Výsledky maximálního napětí obou skupin vidíme na obr. 83.

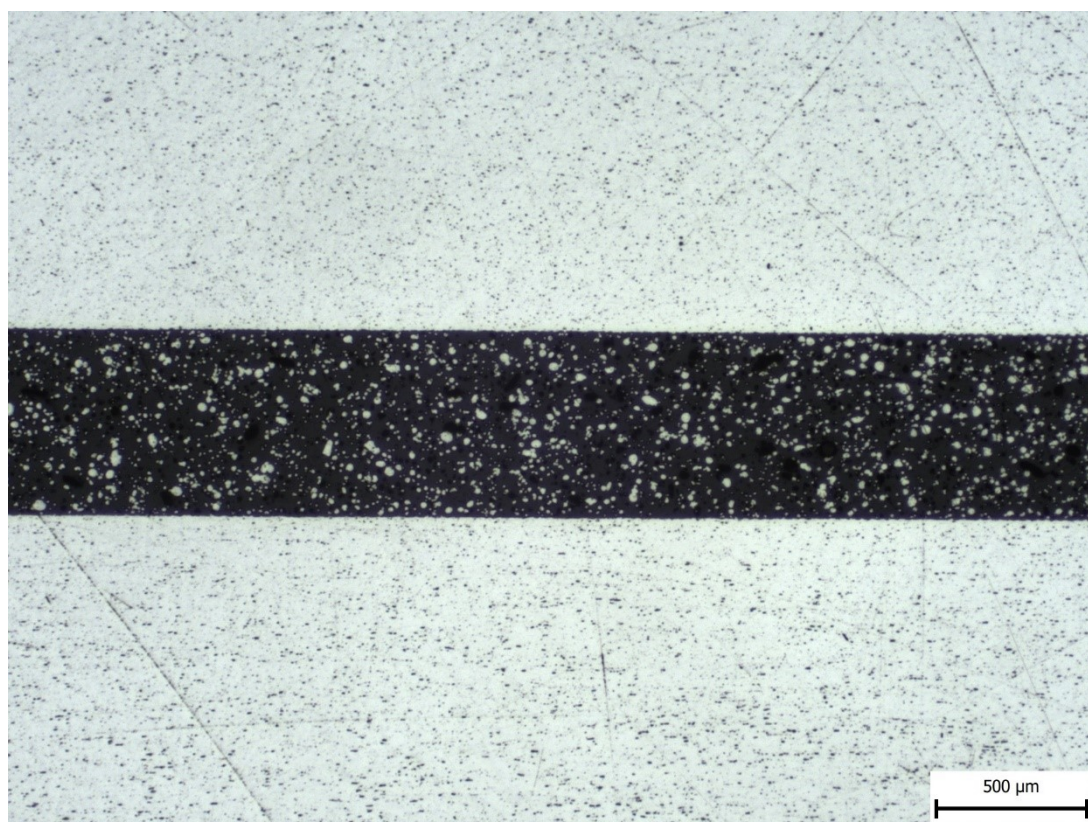


Obr. 83 Porovnání maximálního napětí skupin C1 a C2.

Jak vidíme z grafu u vzorků s čištěnými plochami s pomocí gravírovacího laseru dosahujeme maximálních napětí okolo 27 MPa což je více než u vygravírovaných zámků. Avšak stále nebylo dosaženo parametrů výrobce, který deklaruje maximální napětí okolo 40 MPa. Důvodem takto nižších maximálních napětí je již dříve nastíněné natáčení vzorků v průběhu tahové zkoušky, kdy se mění stav napjatosti vzorků z jednoosé na víceosou napjatost. Taktéž nutno podotknout, že vzorky vytvrzené ve vakuu dosahují mírně vyšších maximálních napětí a také dosahují stabilnějších výsledků oproti skupině vytvrzených v přípravku. Mikrostruktury lepených spojů čištěných ploch gravírovacím laserem vidíme na obr. 84 a obr. 85.



Obr. 84 Mikrostruktura lepeného spoje s čištěnými plochami pomocí gravírovacího laseru + přípravek (C1).



Obr. 85 Mikrostruktura lepeného spoje s čištěnými plochami pomocí gravírovacího laseru + vakuum (C2).

Vyhodnocení a závěr

Z výsledků měření výšky spáry lepidla vychází, že opět nebyla dodržena spára lepidla. Do budoucna z toho plyne poznatek, že bude třeba zajistit větší přitlačnou sílu při požadavku spáry lepidla 0,05 mm. Skupina vzorků vytvrzených ve vakuu opět dosahuje větší spáry lepidla než skupina vzorků vytvrzených v přípravku. Naměřené hodnoty tloušťky spáry lepidla vidíme v tab. 27 a následné vyhodnocení těchto dat vidíme v tab. 28.

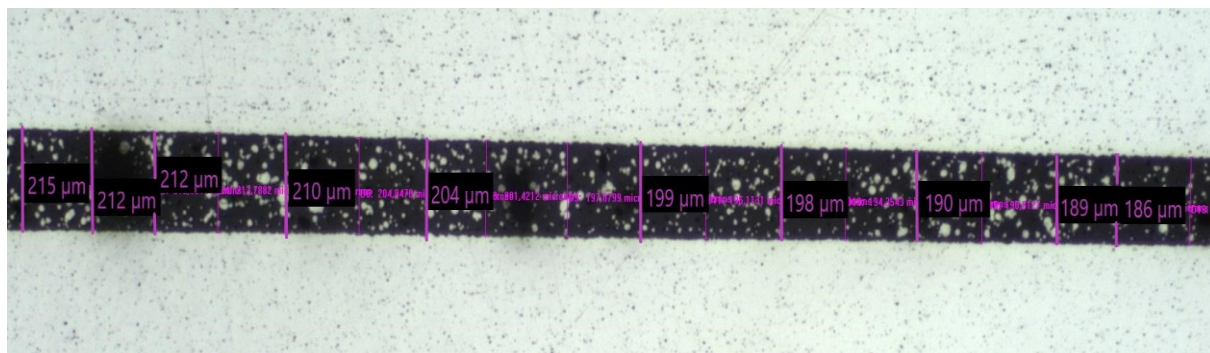
Tab. 27 Hodnoty měření spáry lepidla C1/C2.

Číslo měření	C1 [μm]	C2 [μm]
Měření č.1	215,55	346,14
Měření č.2	212,04	346,02
Měření č.3	212,02	350,01
Měření č.4	213,79	348,02
Měření č.5	210,31	348,01
Měření č.6	204,95	348,09
Měření č.7	204,98	350,02
Měření č.8	201,42	
Měření č.9	197,88	
Měření č.10	199,65	
Měření č.11	196,11	
Měření č.12	197,89	
Měření č.13	194,35	
Měření č.14	190,82	
Měření č.15	190,81	
Měření č.16	189,05	
Měření č.17	196,12	
Měření č.18	187,35	

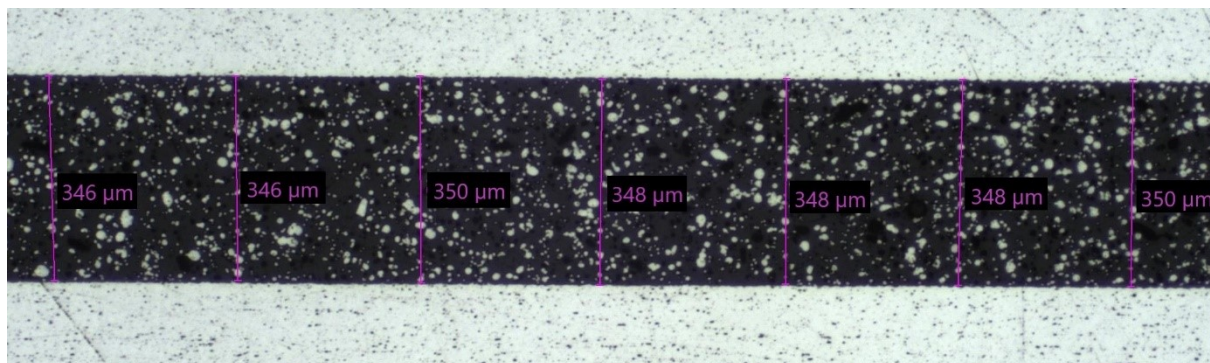
Tab.28 Vyhodnocení skupin C1/C2.

Označení vzorku	C1 [μm]	C2 [μm]
Střední hodnota	200,84	348,05
Chyba střední hodnoty	2,13	0,61
Medián	198,77	348,02
Směr. odchylka	9,03	1,61
Rozptyl výběru	81,52	2,58
Minimum	187,35	346,02
Maximum	215,55	350,02
Počet	18	7

Ukázku z měření spáry lepidla vidíme na obr. 86 a obr. 87.



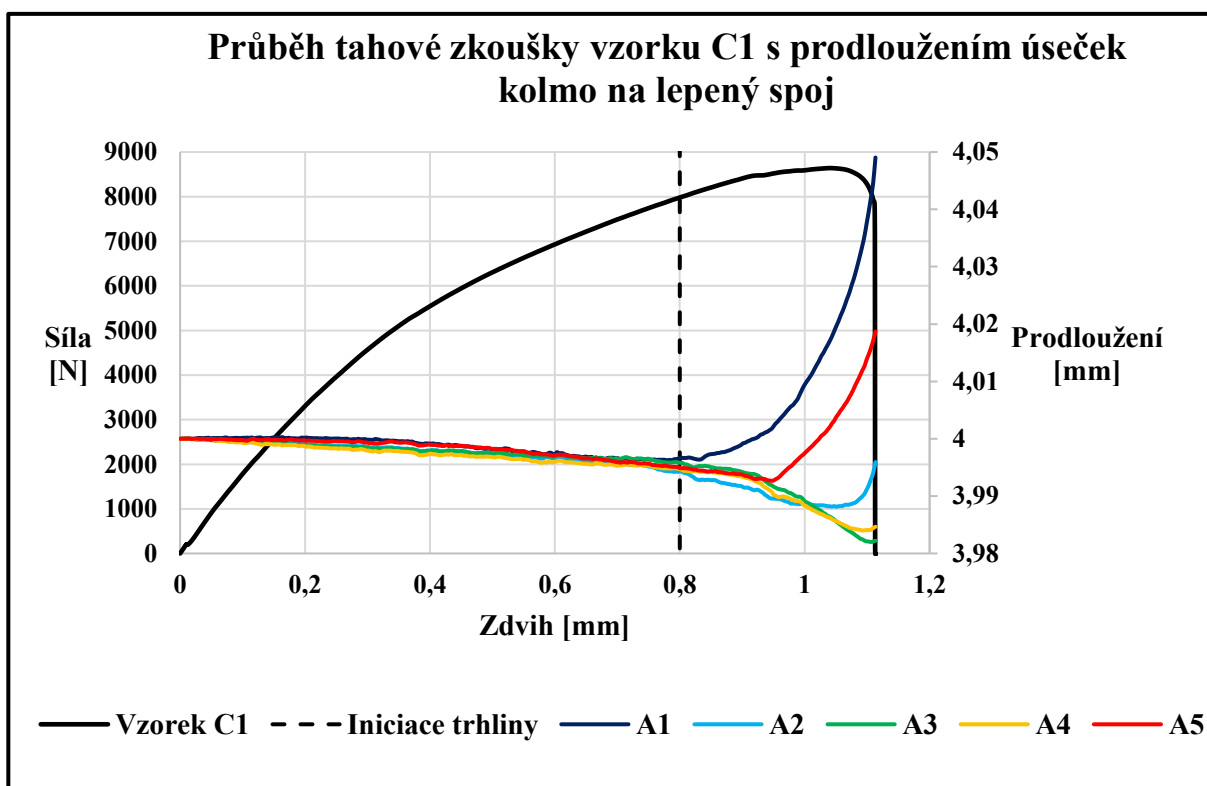
Obr. 86 Měření tloušťky spáry lepidla u spoje s čistěnými plochami gravírovacím laserem + přípravek (C1).



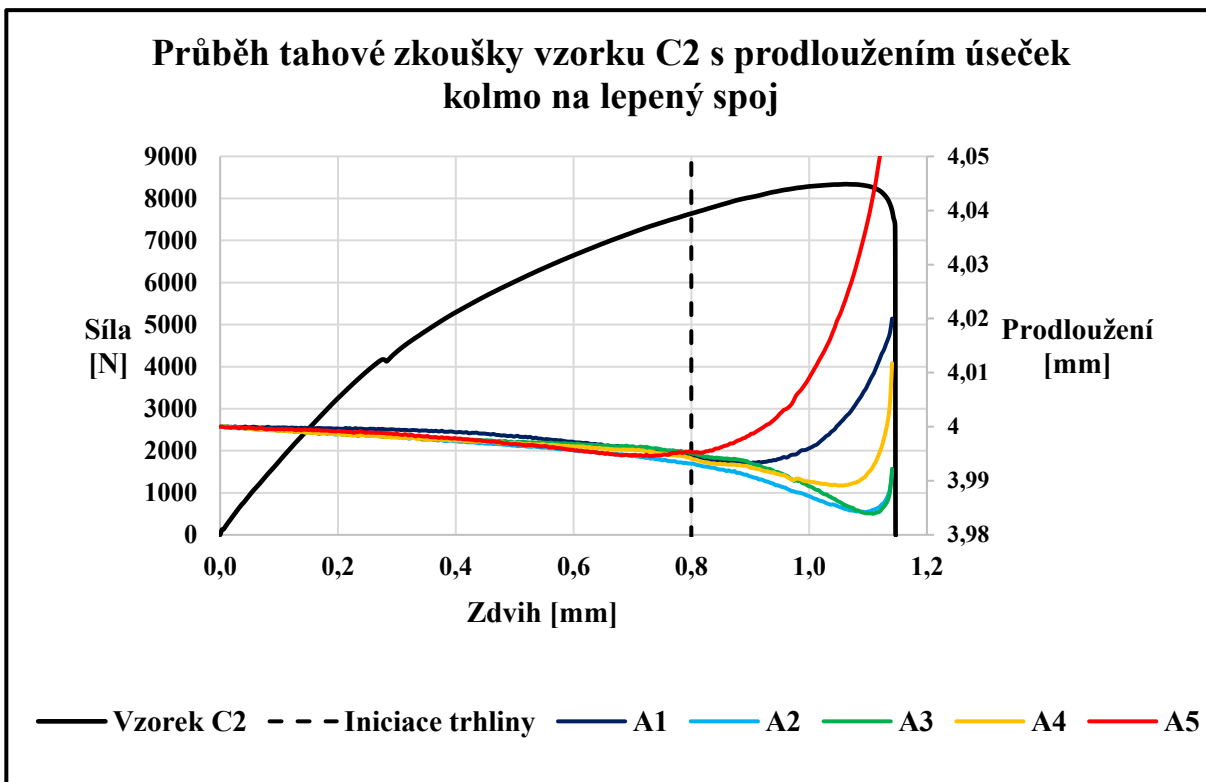
Obr. 87 Měření tloušťky spáry lepidla u spoje s čistěnými plochami gravírovacím laserem + vakuum (C2).

4.3.1 Digitální korelace obrazu u skupiny C1 a C2

Z charakteru poškození lepeného spoje bylo naznačeno, že dochází v průběhu tahové zkoušky k rotaci vzorků a ke změně stavu napjatosti vzorků z jednoosé na víceosou napjatost. Pro potvrzení tohoto chování byla použita metoda digitální korelace. Pro zjištění odlupování jsme využili úseček A1 až A5, které byly umístěny kolmo přes lepený spoj. Srovnání prodloužení úseček kolmých na lepený spoj se samotným průběhem tahové zkoušky vidíme na obr. 88 a obr. 89.

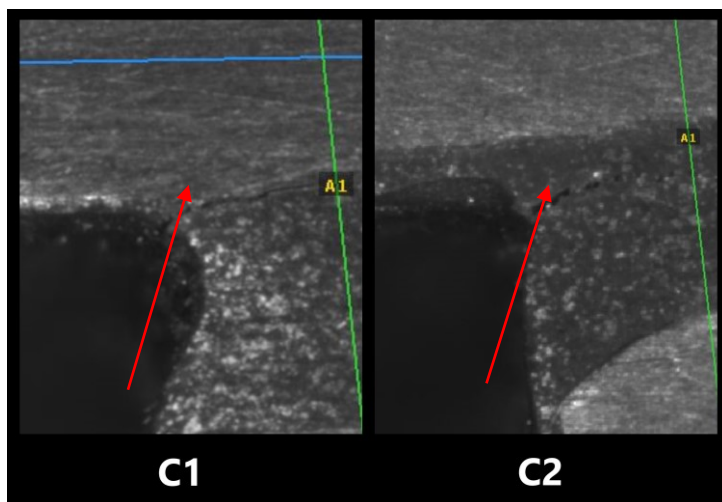


Obr. 88 Průběh tahové zkoušky vzorku C1 čistění pomocí gravírovacího laseru + přípravek s prodloužením úseček kolmo na lepený spoj.



Obr. 89 Průběh tahové zkoušky vzorku C2 čištění pomocí gravírovacího laseru + vakuum s prodloužením úseček kolmo na lepený spoj.

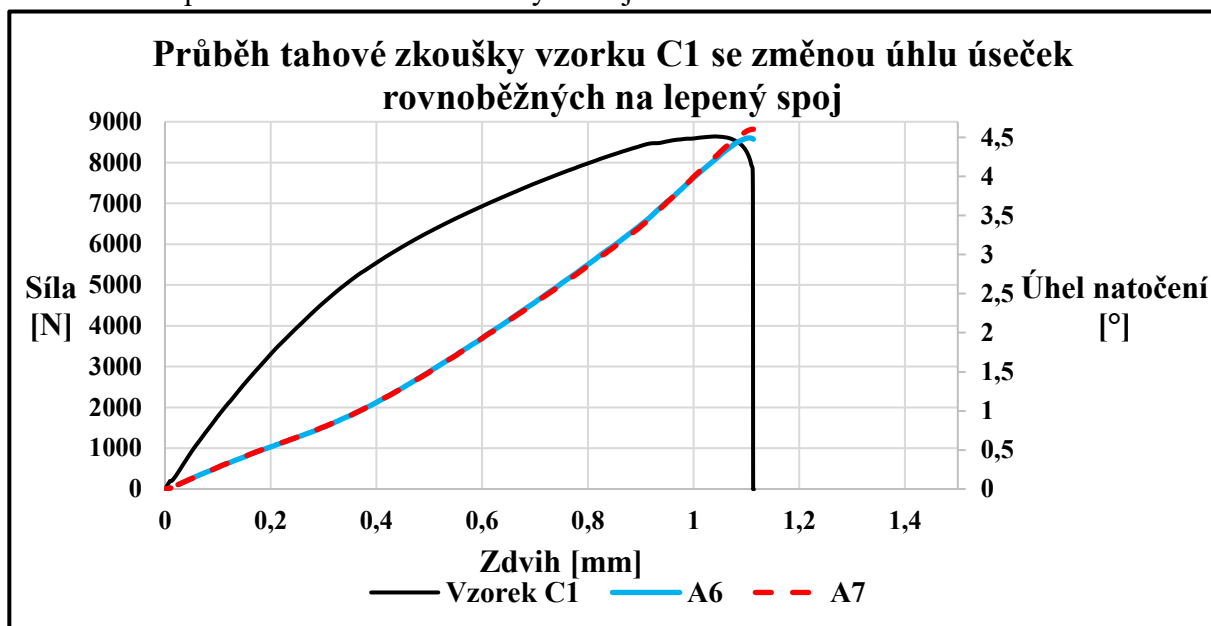
Tyto grafy získané pomocí digitální korelace obrazu potvrzují naše tvrzení o směru lomu lepidla a to vždy od čelních ploch ke středu lepeného spoje, což je charakteristické pro odlupování. Nejvyšších prodloužení dosahují úsečky A1 a A5, které jsou umístěny právě na krajích lepeného spoje. Zatímco úsečka A3 umístěná ve středu lepeného spoje je po celou dobu měření téměř neměnná. Dále lze zaznamenat moment kdy začíná iniciace odlupové trhliny. U vzorku C1 při hodnotě prodloužení 0,8 mm a u vzorků C2 0,85 mm tyto trhliny vidíme na obr. 90.



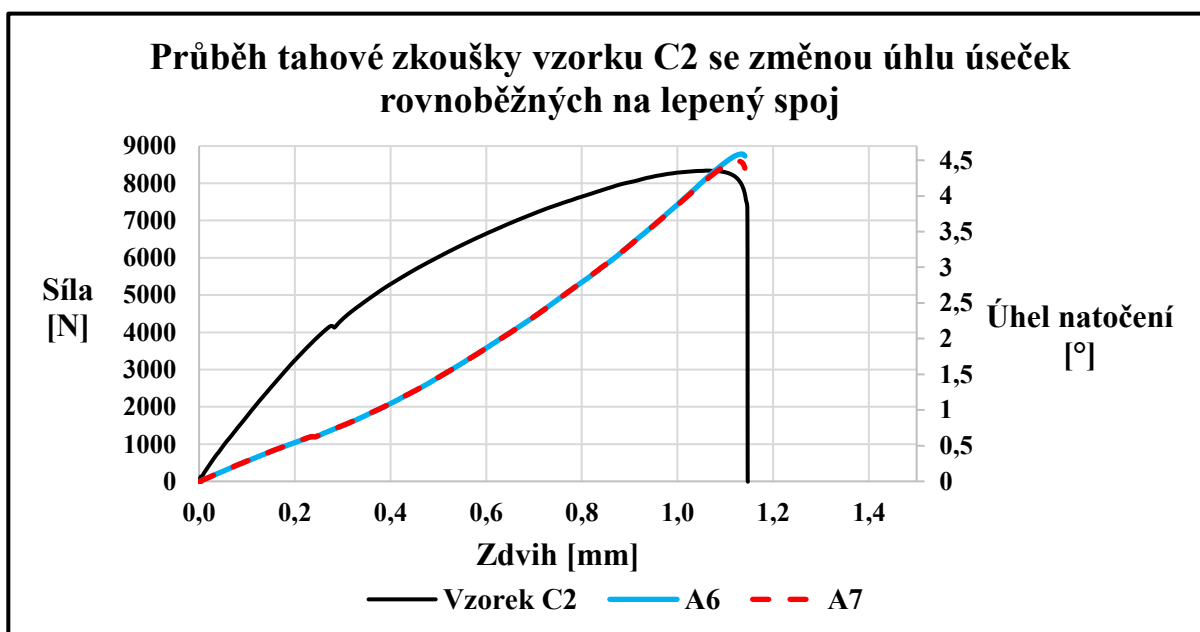
Obr. 90 Inicie trhliny u vzorků C a C2.

Vyhodnocení a závěr

Taktéž si lze povšimnout, že při hodnotě prodloužení kolem 0,3 mm dochází ke změně směrnice síla/prodloužení. Tuto změnu vysvětlují obr. 91 a obr. 92.



Obr. 91 Průběh tahové zkoušky vzorku C1 čištění pomocí gravírovacího laseru + přípravek se změnou úhlu úseček rovnoběžných na lepený spoj.



Obr. 92 Průběh tahové zkoušky vzorku C2 čištění pomocí gravírovacího laseru + vakuum se změnou úhlu úseček rovnoběžných na lepený spoj.

Pomocí těchto grafů je patrné, že právě při hodnotě prodloužení 0,3 mm dochází nejen ke změně trendu u průběhu síla/prodloužení, ale také u trendu změny úhlu natočení úseček A6 a A7, které byly umístěny v základním materiálu a rovnoběžně s lepeným spojem. Při této hodnotě dojde již k významné rotaci vzorků a tím změně stavu napjatosti vzorků z jednoosé na víceosou napjatost.

4.4 Vyhodnocení skupiny D čištěné pomocí průmyslového laseru

Bylo otestováno vždy 10 vzorků z každé skupiny, jak vytvrzených v přípravku, tak ve vakuu. V tab. 29 a tab. 30 vidíme kompletní výsledky trhacích zkoušek skupiny vzorků D.

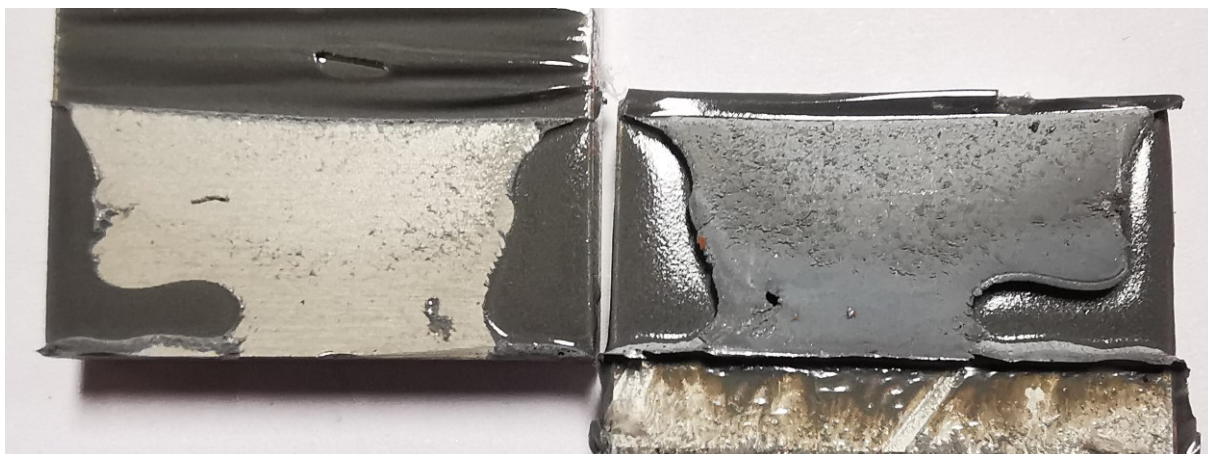
Tab. 29 Výsledky trhací zkoušky vzorků čištěných pomocí průmyslového laseru D + přípravek (D1).

Typ zámku	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Laserčištění D1	D1.1	8496,1	1,137	27,188
Laserčištění D1	D1.2	8192,45	1,092	26,216
Laserčištění D1	D1.3	8018,52	0,963	25,659
Laserčištění D1	D1.4	8704,16	1,165	27,853
Laserčištění D1	D1.5	8397,09	1,11	26,871
Laserčištění D1	D1.6	8133,79	1,103	26,028
Laserčištění D1	D1.7	8376,99	1,139	26,806
Laserčištění D1	D1.8	8257,77	0,978	26,425
Laserčištění D1	D1.9	8278,5	1,056	26,491
Laserčištění D1	D1.10	8175,71	1,132	26,162
Aritmetický průměr		8331,3	1,088	26,501

Tab. 30 Výsledky trhací zkoušky vzorků čištěných pomocí průmyslového laseru D + vakuum (D2).

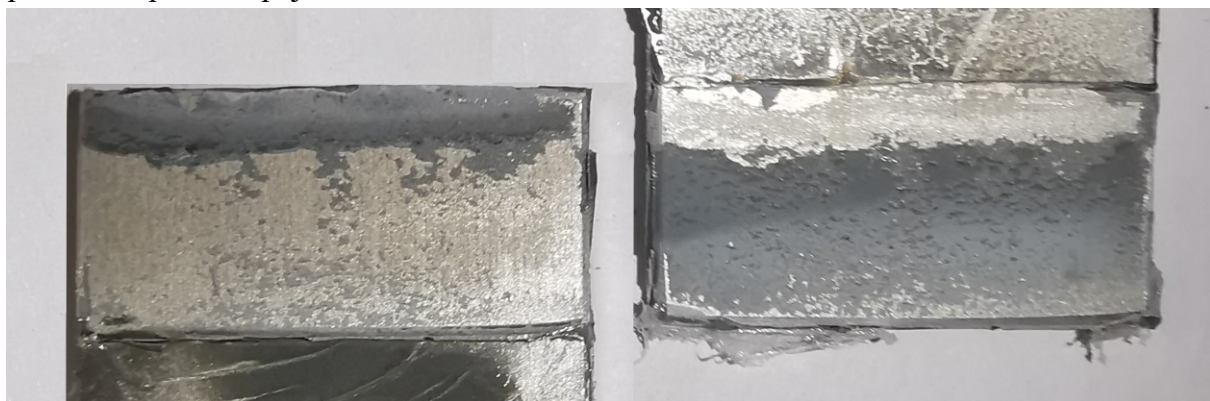
Typ zámku	Číslo vzorku	Síla [N]	Zdvih [mm]	Mez pevnosti [MPa]
Laserčištění D2	D2.1	8209,63	1,225	26,271
Laserčištění D2	D2.2	8346,54	1,22	26,709
Laserčištění D2	D2.3	8370,11	1,18	26,784
Laserčištění D2	D2.4	4918,38	0,595	15,739
Laserčištění D2	D2.5	6862,78	0,892	21,961
Laserčištění D2	D2.6	8452,87	1,107	27,049
Laserčištění D2	D2.7	8559,68	1,255	27,391
Laserčištění D2	D2.8	8360,79	1,073	26,755
Laserčištění D2	D2.9	7741,1	0,941	24,772
Laserčištění D2	D2.10	7641,38	1	24,452
Aritmetický průměr		7746,33	1,049	26,273

Vzorky D2.4 a D2.5 byly vyřazeny z hodnocení kvůli špatně přilnutému lepidlu k lepeným plochám, na obr. 93 vidíme jeden z defektů u skupiny vzorků D2.



Obr. 93 Defekt u skupiny vzorků D2.

U vzorků čištěných pomocí průmyslového laseru docházelo k obdobným porušením jako u skupiny vzorků čištěných pomocí gravírovacího laseru. Hlavně docházelo k adheznímu lomu nebo ke kombinovanému porušení s převážujícím adhezním charakterem. Obě tyto porušení lepeného spoje vidíme na obr. 94 a obr. 95.



Obr. 94 Ukázka adhezního lomu u laserově čištěných vzorků.



Obr. 95 Ukázka kombinovaného lomu u laserově čištěných vzorků.

Vyhodnocení a závěr

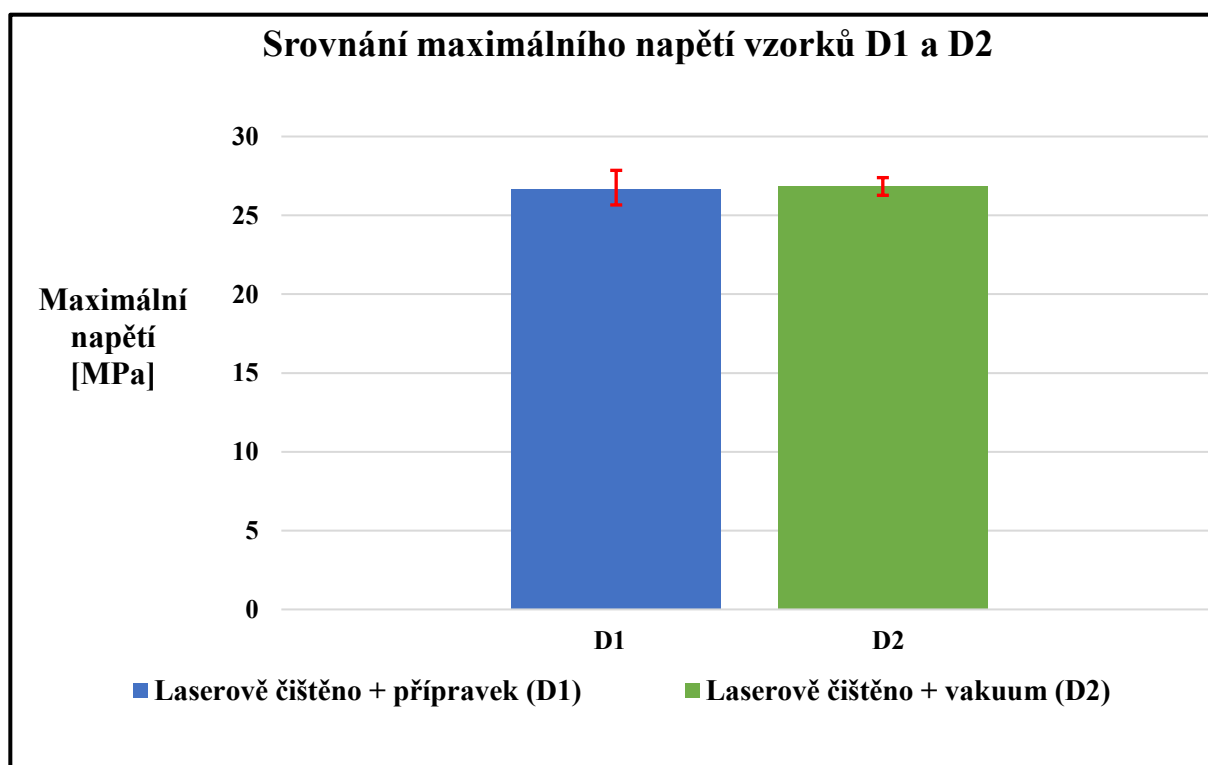
Vzorky čištěné průmyslovým laserem se velice podobají vzorkům čištěných pomocí gravírovacího laseru. Podobné jsou jak typy porušení, tak zřetelný směr lomu od čelní plochy ke středu lepeného spoje. Taktéž měření drsnosti ploch čištěných průmyslovým laserem vykazovalo podobnou drsnost jako vzorky čištěné gravírovacím laserem. Výsledky měření a srovnání se skupinou C vidíme v tab. 31.

Tab. 31 Srovnání drsností vzorků čištěných pomocí průmyslového a gravírovacího laseru.

Plocha	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
Čištění pomocí průmyslového laseru	0,817	1,069	5,224
Čištění pomocí gravírovacího laseru	0,739	0,934	4,846

- ➔ Ra – Střední aritmetická úchylka profilu
- ➔ Rq – Aritmetická úchylka profilu 10 náhodných bodů
- ➔ Rz – Maximální výška nerovnosti profilu

Výsledky dosaženého maximálního napětí skupiny D1 a D2 vidíme na obr. 96.

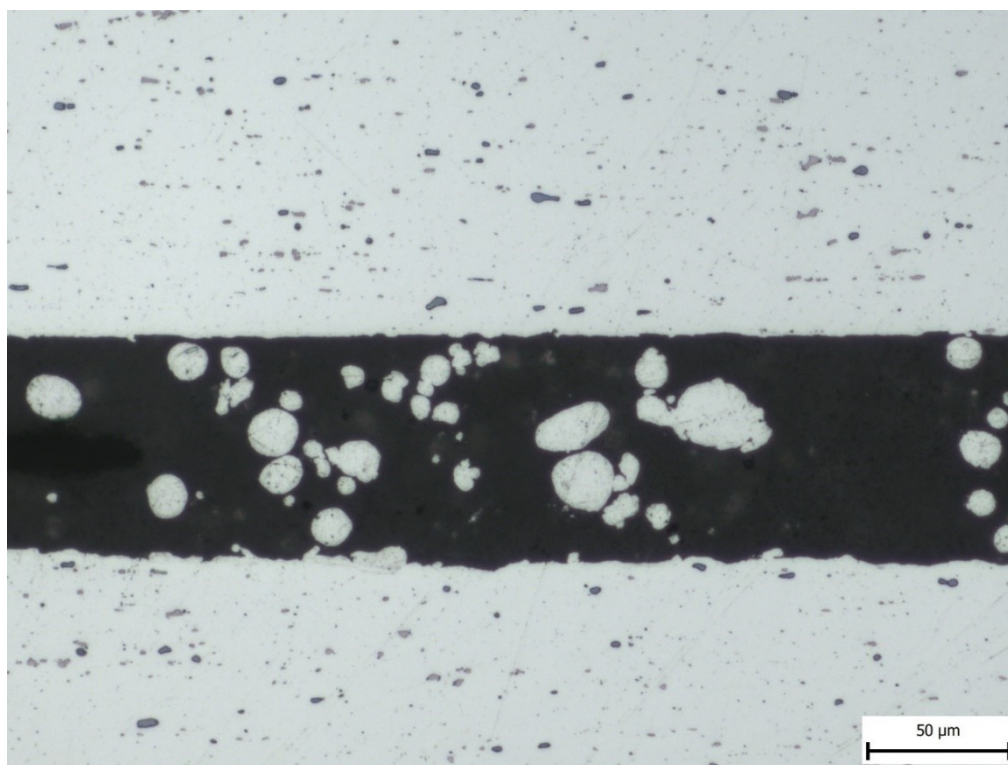


Obr. 96 Porovnání maximálního napětí skupin D1 a D2.

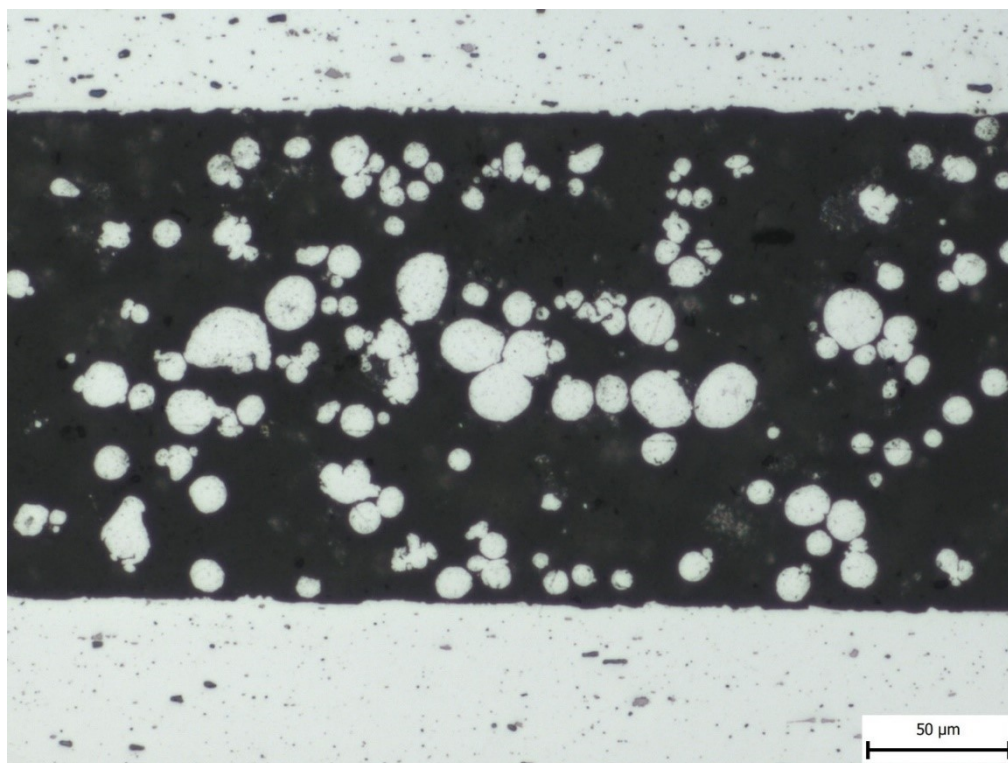
Vzorky čištěné průmyslovým laserem dosáhly průměrného maximálního napětí okolo 27 MPa. Znova velice podobných hodnot jako vzorky čištěné pomocí gravírovacího laseru (C), taktéž i zde u skupiny čištěné průmyslovým laserem dosahují vzorky vytvrzené ve vakuu mírně vyšších a stabilnějších hodnot maximálního napětí.

Vyhodnocení a závěr

Mikrostruktury obou lepených spojů jak D1, tak D2 vidíme na obr. 97 a obr. 98.



Obr. 97 Mikrostruktura lepeného spoje vzorků čištěných průmyslovým laserem + přípravek (D1).



Obr. 98 Mikrostruktura lepeného spoje vzorků čištěných průmyslovým laserem + vakuum (D2).

Vyhodnocení a závěr

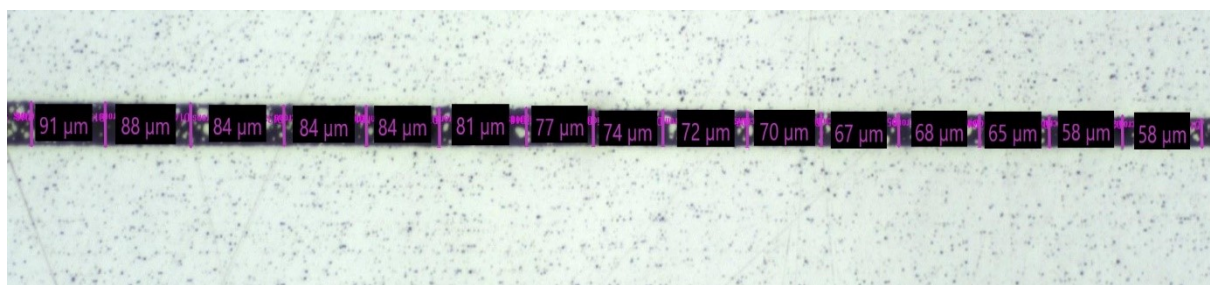
Jak lze už z metalografických výbrusu vyčíst spára lepidla u vzorků D2 je větší než u skupiny D1. Nicméně u vzorků D1 bylo dosaženo téměř plánované tloušťky lepidla. Naměřené hodnoty tloušťky spáry lepidla skupiny D vidíme v tab. 32 a následné vyhodnocení těchto dat vidíme v tab. 33.

Tab. 32 Výsledky měření spáry lepidla D1/D2. Tab. 33 Vyhodnocení spáry lepidla u skupin D1/D2.

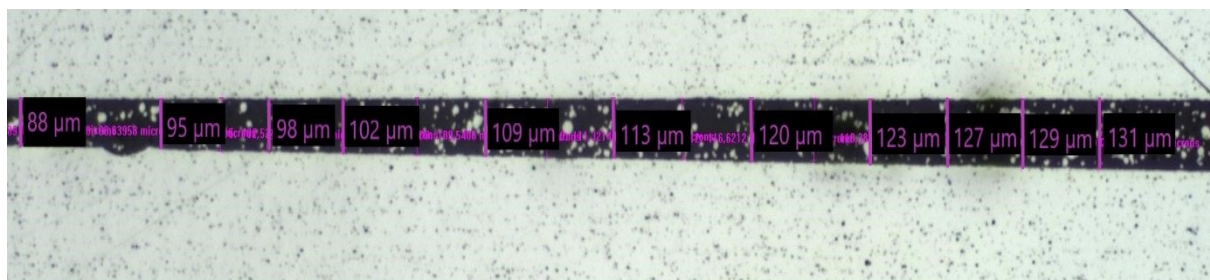
Číslo měření	D1 [μm]	D2 [μm]
Měření č.1	58,30	88,34
Měření č.2	58,30	91,87
Měření č.3	65,39	90,12
Měření č.4	68,90	97,19
Měření č.5	67,14	98,96
Měření č.6	70,67	102,47
Měření č.7	75,99	107,77
Měření č.8	74,20	109,55
Měření č.9	77,74	109,55
Měření č.10	81,27	113,09
Měření č.11	84,81	118,37
Měření č.12	84,81	120,14
Měření č.13	83,04	121,91
Měření č.14	88,34	125,49
Měření č.15	91,87	134,29
Měření č.16	91,89	134,28

Označení vzorku	D1 [μm]	D2 [μm]
Střední hodnota	76,42	111,84
Chyba střední hodnoty	2,73	3,84
Medián	76,87	109,55
Směr. odchylka	10,92	15,81
Rozptyl výběru	119,24	250,07
Minimum	58,30	88,34
Maximum	91,89	137,82
Počet	16	17

Ukázku z měření spáry lepidla u vzorků D1 vidíme na obr. 99 a ukázku z měření D2 vidíme na obr. 100.



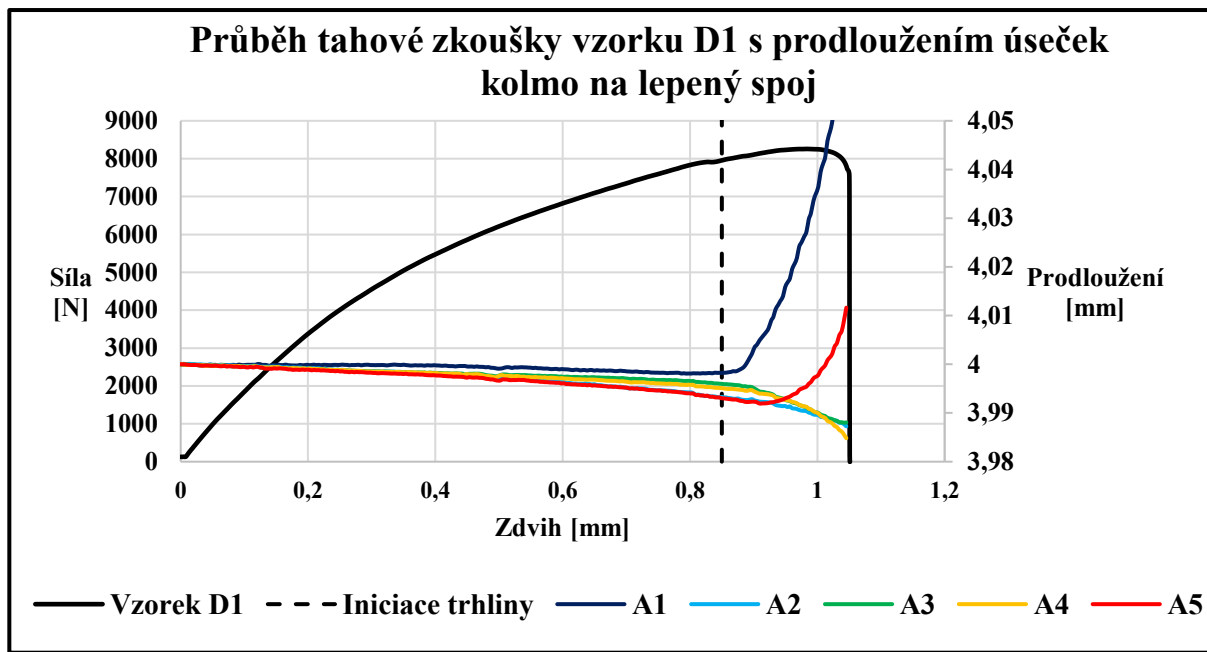
Obr. 99 Měření tloušťky spáry lepidla u spoje s čištěnými plochami průmyslovým laserem + přípravek (D1).



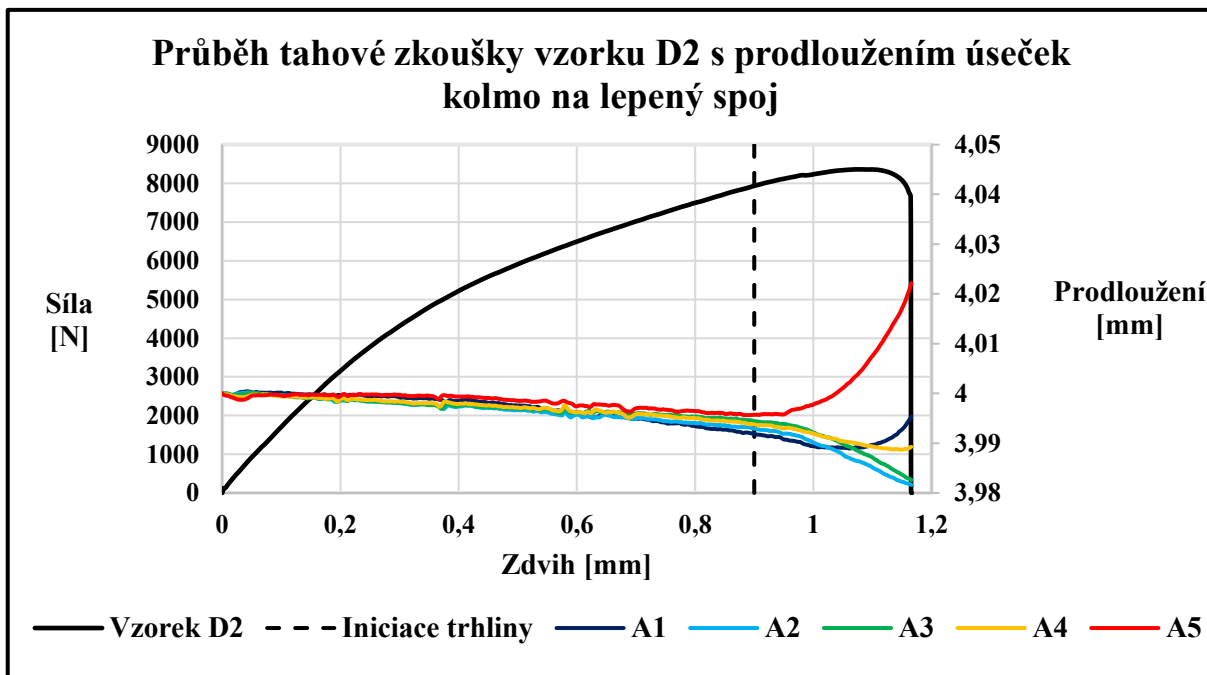
Obr. 100 Měření tloušťky spáry lepidla u spoje s čištěnými plochami průmyslovým laserem + vakuum (D2).

4.4.1 Digitální korelace obrazu skupiny u D1 a D2

Taktéž u této skupiny vzorků proběhlo ověření směru lomu lepeného spoje a změny stavu napjatosti vzorku pomocí digitální korelace obrazu. Srovnání prodloužení úseček kolmých na lepený spoj se samotným průběhem tahové zkoušky vzorků D vidíme na obr. 101 a obr. 102.

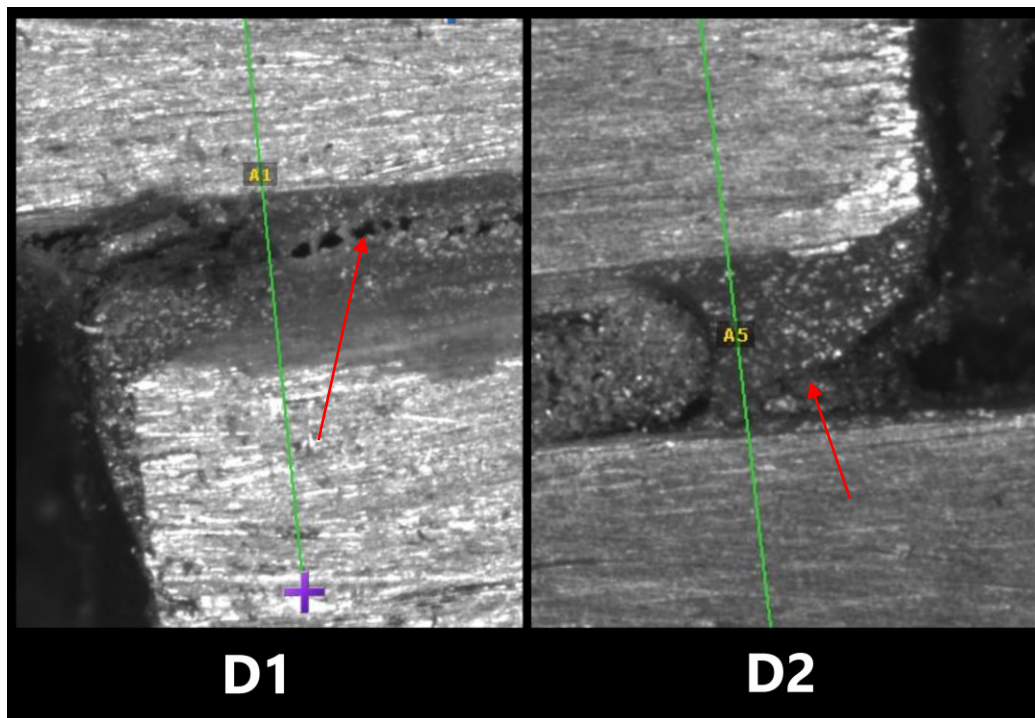


Obr. 101 Průběh tahové zkoušky vzorku D1 čištění pomocí průmyslového laseru + přípravek s prodloužením úseček kolmo na lepený spoj.



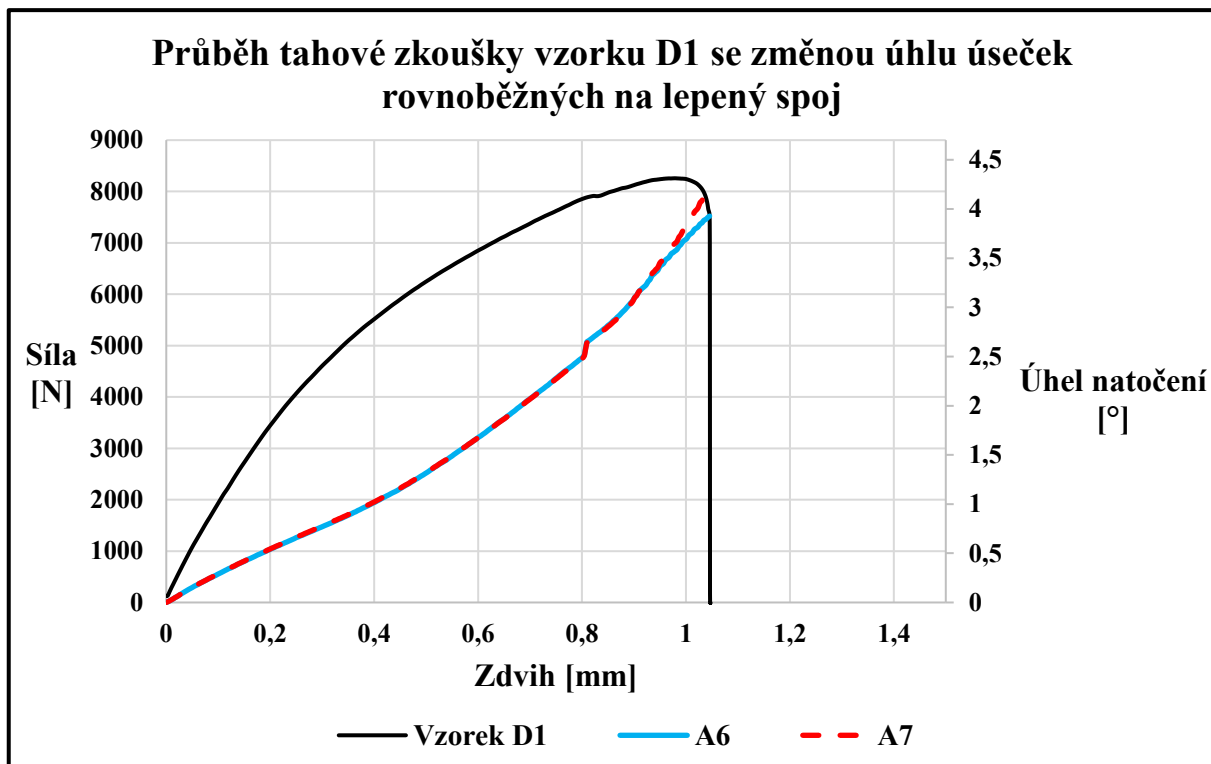
Obr. 102 Průběh tahové zkoušky vzorku D2 čištění pomocí průmyslového laseru + vakuum s prodloužením úseček kolmo na lepený spoj.

Taktéž se zde opakuje stejný trend a to ten, že krajní úsečky A1 a A5 dosahují největších prodloužení, což potvrzuje směr lomu od čelní plochy ke středu lepeného spoje. K iniciaci trhliny u vzorků D1 došlo při prodloužení 0,85 mm a u vzorků D2 při 0,9 mm. Tyto trhliny vidíme na obr. 103.

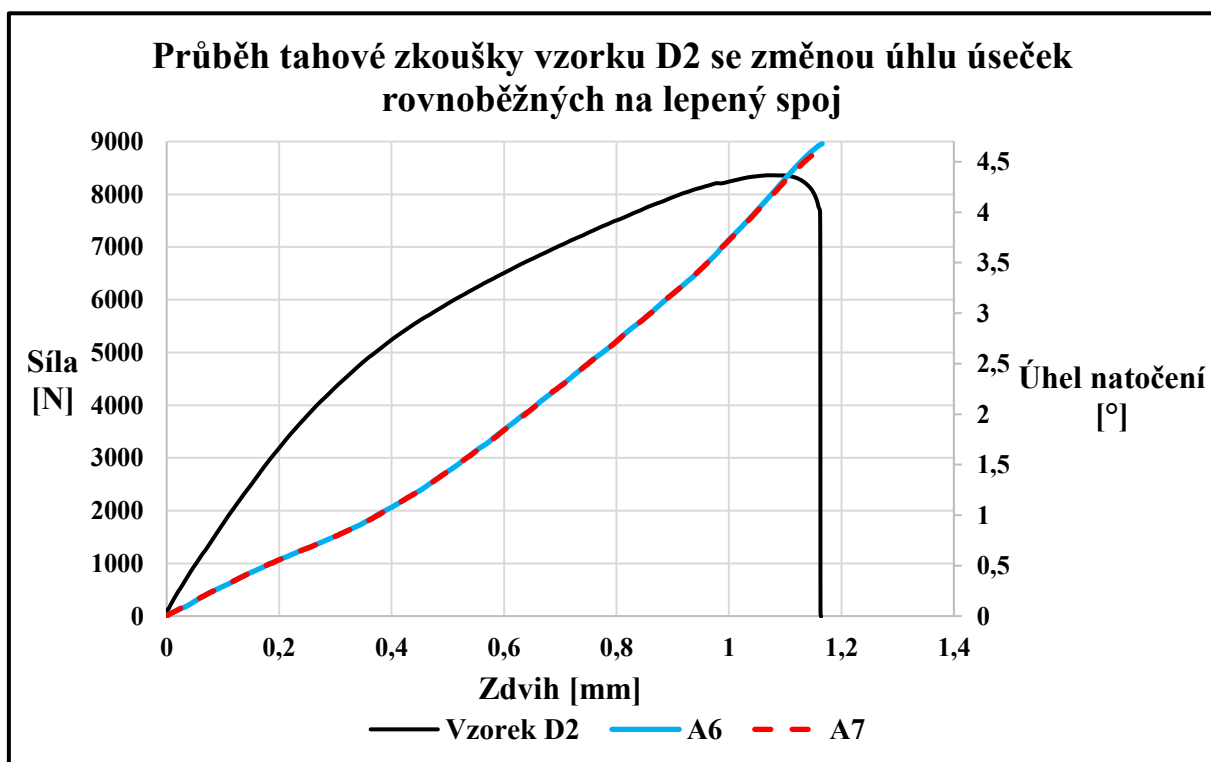


Obr. 103 Iniciace trhliny u vzorků D1 a D2.

U vzorků D1 a D2 byly taktéž zpozorovány změny trendu u křivky síla/prodloužení a na následujících grafech obr. 104 a obr. 105 potvrzena rotace vzorků a tím způsobené změny stavu napjatosti. Touto změnou dochází ke zpomalení nárustu síly na prodloužení v závislosti na velikosti úhlu natočení slepených vzorků.



Obr. 104 Průběh tahové zkoušky vzorku D1 s čištěním pomocí průmyslového laseru + přípravek se změnou úhlu úseček rovnoběžných na lepený spoj.

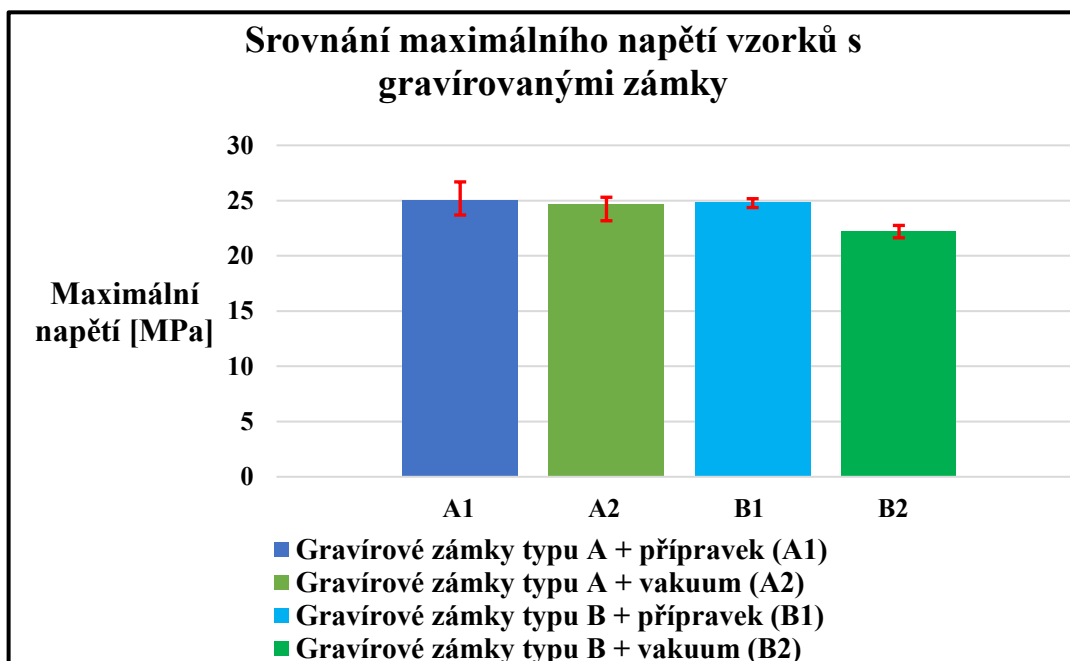


Obr. 105 Průběh tahové zkoušky vzorku D2 s čištěním pomocí průmyslového laseru + vakuum se změnou úhlu úseček rovnoběžných na lepený spoj.

4.5 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřená na technologie předúpravy lepených ploch hliníkových slitin s následnou tahovou zkouškou s podporou digitální korelace obrazu. Cílem této diplomové práce bylo ověřit, pomocí které z povrchových úprav dosahuje lepený spoj nejvyšších mechanických vlastností a vyšetřit průběh stavu napjatosti vzorků při tahové zkoušce pomocí digitální korelace obrazu.

Při testování vygravírovaných zámků nebylo dokázáno, že by tato předúprava povrchu zvyšovala mechanické vlastnosti lepeného spoje. A to z důvodů expanze vzduchu do lepeného spoje z mikropórů vzniklých intenzivním paprskem gravírovacího laseru a nezdařilým spasováním vzorků. K této technologii se váže vysoká přesnost výroby těchto zámků a nutnost přípravků pro lepení, aby docházelo ke správnému spasování. Tento faktor nejen nepříznivě ovlivňuje cenu této předúpravy povrchu, ale také ztěžuje zavedení této technologie v prototypové výrobě. Výsledné srovnání vygravírovaných zámků A vytvrzených v přípravku/ve vakuu a vygravírovaných zámků B taktéž vytvrzených v přípravku i ve vakuu vidíme na obr. 106.



Obr. 106 Srovnání maximálního napětí vzorků s vygravírovanými zámký.

Ze srovnání vychází, že skupiny vzorků A1, A2 a B1 dosahují podobných maximálních napětí ve spoji a to okolo 25 MPa. Jenom skupina B2 vykazuje nižší hodnoty, a to z důvodu větší spáry lepidla, která byla velmi oslabena mikrobublínkami vzduchu v lepeném spoji.

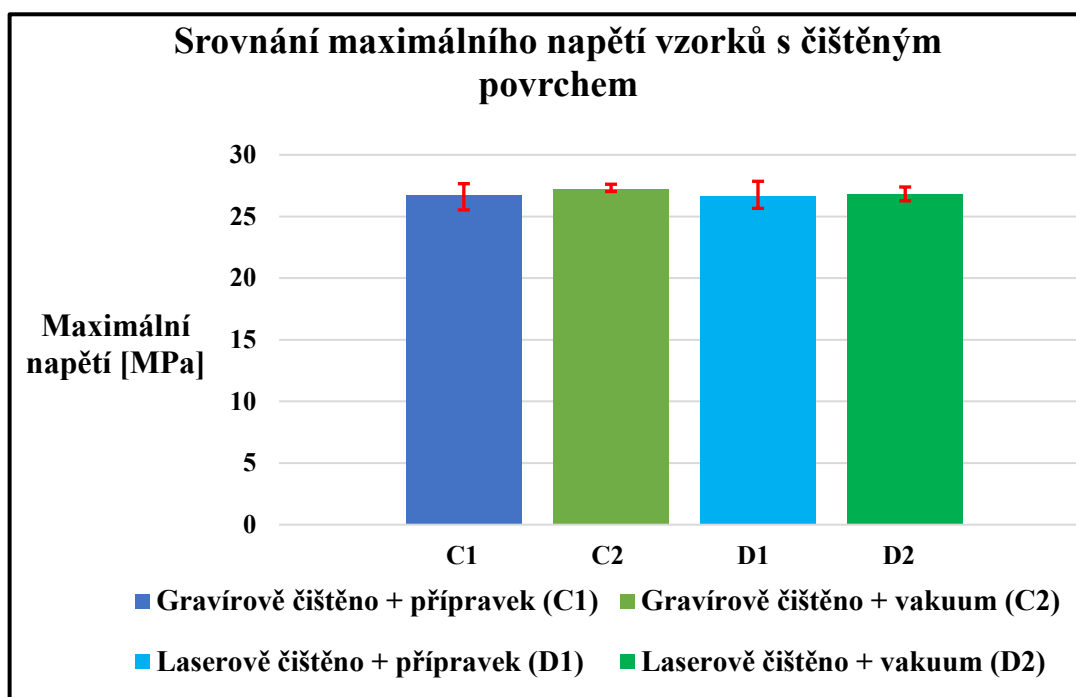
Vyhodnocení a závěr

U další kategorie vzorků, a to s čištěnými plochami lepeného spoje buďto pomocí gravírovacího laseru (C) nebo pomocí průmyslového čistícího laseru (D), bylo zjištěno, že mezi těmito předúpravami povrchu není významného rozdílu v mechanických vlastnostech lepeného spoje. Vychází to ze srovnání maximálních napětí, jak vidíme na obr. 107 tak i z měření drsnosti obou ploch jejich srovnání vidíme v tab. 34, v obou případech byly naměřeny podobné hodnoty.

Tab. 34 Srovnání měření drsnosti čištěných ploch.

Plocha	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
Čištění pomocí průmyslového laseru	0,817	1,069	5,224
Čištění pomocí gravírovacího laseru	0,739	0,934	4,846

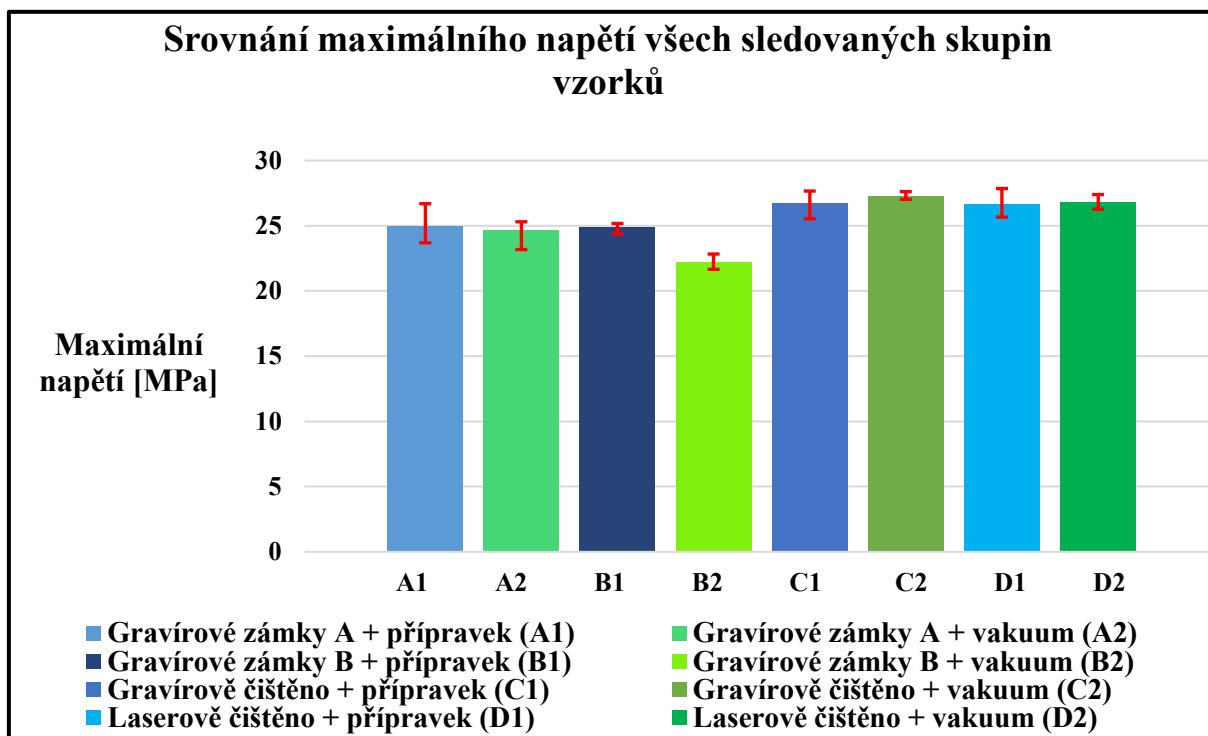
- ➔ Ra – Střední aritmetická úchylka profilu
- ➔ Rq – Aritmetická úchylka profilu 10 náhodných bodů
- ➔ Rz – Maximální výška nerovnosti profilu



Obr. 107 Srovnání maximálního napětí vzorků s čištěným povrchem.

Zde vidíme, že výsledné hodnoty jsou u všech sledovaných skupin podobné a dosahují hodnot okolo 27 MPa. Nutno podotknout, že ačkoliv skupiny vytvrzené ve vakuu (C2, D2) disponují větší spárkou lepidla, nijak se to nepodepisuje na výsledných hodnotách maximálních napětí, dokonce dosahují stabilnější výsledků s menším rozptylem hodnot.

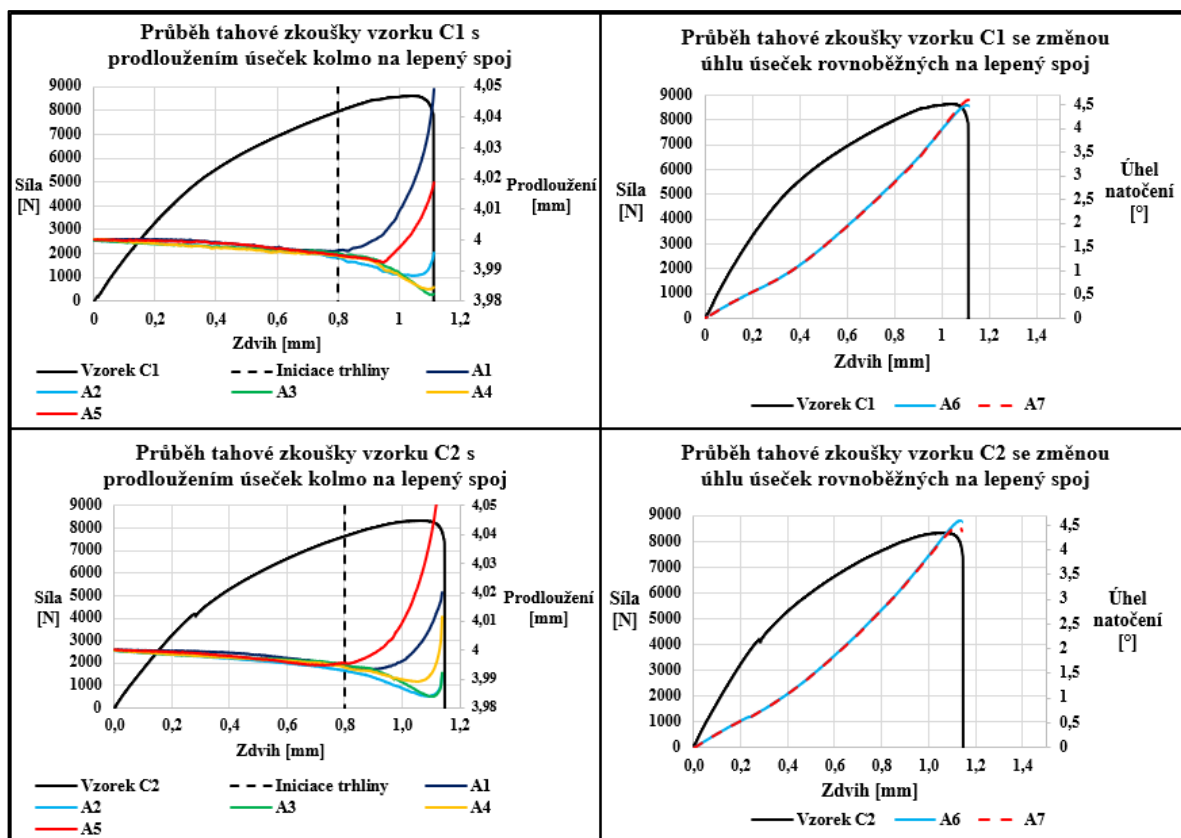
Celkové srovnání všech kategorií a dosažených maximálních napětí vidíme na obr. 108.



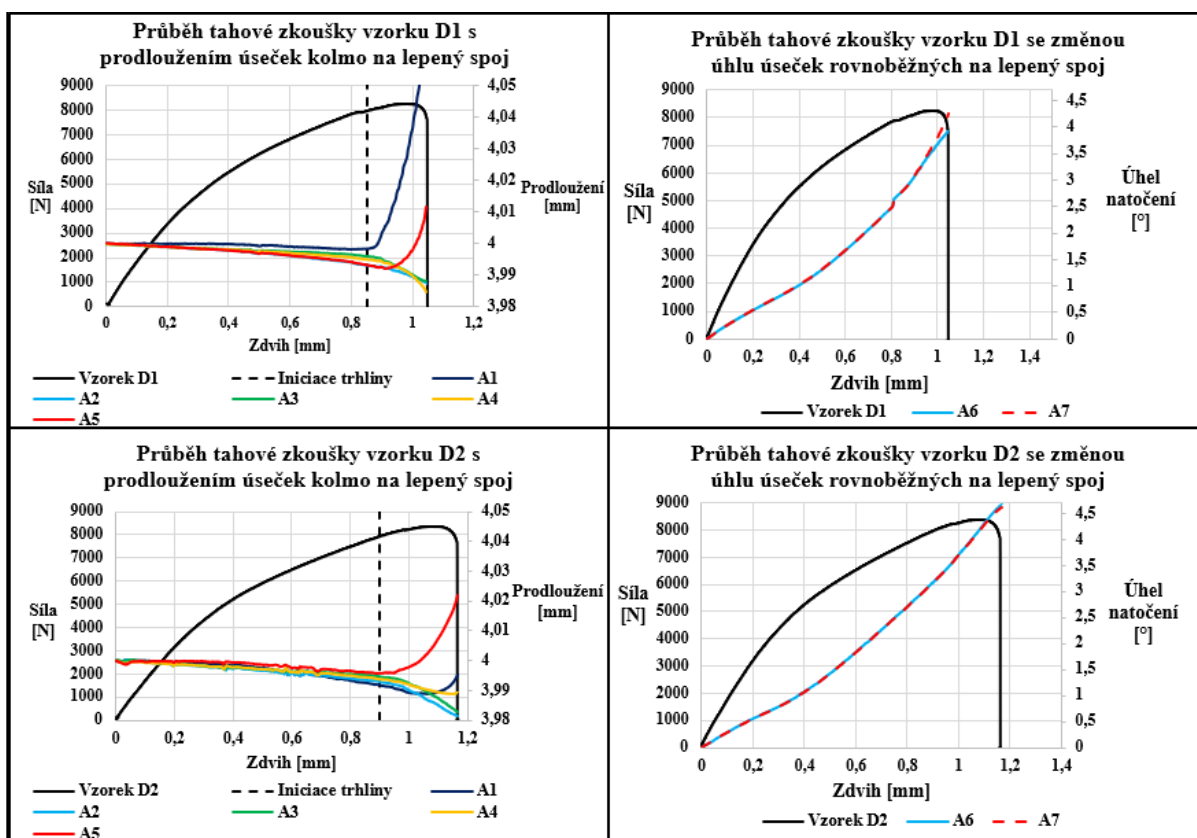
Obr. 108 Srovnání maximálního napětí všech sledovaných skupin vzorků.

Jak lze vyčíst vygravírované zámky kvůli špatnému spasování, ale také kvůli vysoké pórovitosti lepidla nedosáhly vyšších hodnot než vzorky s laserově čištěným povrchem. Dále lze konstatovat, že i přes větší spáru lepidla vzorky vytvrzené pomocí vakua dosahují podobných hodnot maximálního napětí jako vzorky vytvrzené v přípravku.

Pomocí digitální korelace obrazu byl vysvětlen důvod, proč u vzorků s laserově čištěnými plochami nedosahujeme mechanických vlastností předepsaných výrobcem lepidla. Přišlo se na rotaci vzorku v průběhu tahové zkoušky, která měla za následek změnu namáhání působící na testovaný vzorek. Při hodnotě prodloužení větší než 0,3 mm dochází ke změně stavu napjatosti z jednoosé na vícesou napjatost. Tato skutečnost byla potvrzena krajními úsečkami A1 a A5, které byly kolmé k lepenému spoji a dosahovaly největších prodloužení. Tím dokázaly porušení lepeného spoje odlupováním. Další potvrzení této skutečnosti byla korelace mezi trendem úhlu natočení úseček A6 a A7 rovnoběžných s lepeným spojem v závislosti na prodloužení a trendem průběhu síla/prodloužení, kde s čím větším úhlem natočení vzorku, klesal nárůst síly na prodloužení, což dokazuje změnu stavu napjatosti. Výše zmíněné výsledky vidíme na obr. 109 a obr. 110.



Obr. 109 Souhrn výsledků DIC u vzorků C čištěných pomocí gravírovacího laseru.



Obr. 110 Souhrn vyhodnocení DIC u vzorků D čištěných pomocí průmyslového laseru.

Vyhodnocení a závěr

Budoucí výzkum se musí zaměřit na mikrostrukturu lepeného povrchu po gravírovacím laseru, zdali se zde nevyskytují póry. Díky našemu výzkumu bylo potvrzeno, že tyto póry mohou za výsledné mikrobublínky v lepidle kvůli expanzi vzduchu při vytvrzování lepeného spoje. Taktéž bude vhodné pro příští výzkum zvětšit spáru lepidla na bocích vygravírovaných zámků a tím snížit požadavek na přesnost výroby těchto zámků. Dále bude vhodné upravit dosavadní přípravek pro větší průměry šroubu, popřípadě doplnit o druhou řadu přitlačných šroubů, tak aby se zvýšil přitlak působící na vzorky v průběhu vytvrzování. Při použití vakua bude vhodná modifikace vymezovací podložky konkrétně její čelní hrany, kde vytvoření náběžné hrany zlepší přilnutí vakuové folie ke vzorkům a tím se sníží riziko defektů na lepených spojih. Také bylo prokázáno, že technologie přitlaku pomocí vakua není vhodná pro lepené spoje s nízkou spárou lepidla.

Zdroje

- [1] OSTEN, M. *Práce s lepidly a tmely*. Druhé, prepracované vydání. Praha: SNTL, 1982.
- [2] Worldwide Design Handbook. Loctite. 1. vyd. Mainz : Erasmusdruck GmbH, 1998. 452 s. ISBN 0-96 5590-0-5.
- [3] KUCZMASZEWSKI, J. *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. Lublin: Polish Academy of Sciences, Lublin Branch, 2006. ISBN 8389293110.
- [4] EBNESAJJAD, S. Handbook of adhesives and surface Preparation. 2nd ed. Norwich : William Andrew, 2008. ISBN 978-0-8155-1533-3.
- [5] MATTSON, Connor. The Physics of Adhesives. The Physics of Adhesives [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Connor_Mattson/connor_mattson/physics.html
- [6] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980.
- [7] LEE, Lieng-Huang. Adhesive bonding. New York: Plenum Press, 1991. ISBN 03-064-3471-7.
- [8] FREJDIN, Anatolij Semenovič. *Pevnost' a životnost' lepených spojov*. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia chemickej literatúry (Alfa).
- [9] Doplnkové technologie pro zpracování plastů. Katedra strojírenské technologie TUL [online]. Liberec [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
- [10] LasCam. *LasCam.cz* [online]. Praha, 2016, 2016 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/lasery-pro-cisteni/>
- [11] WU, Yongrong, Jianping LIN a Blair E. CARLSON. Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys. *Surface & Coatings Technology* [online]. 2016, (304), 8 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897216303115#f0015>
- [12] EBNESAJJAD, Sina a Cyrus EBNESAJJAD. Surface treatment of materials for adhesive bonding. Second edition. Elsevier, 2014. ISBN 9780323264358.

- [13] Openair®- Plasma Systems. *Iontech.cz* [online]. Pardubice, 2020 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.lontech.cz/filedownloads-1534-aff6d9510764>
- [14] ZHENG, Rui, Jianping LIN, Pei-Chung WANG a Chuanmin ZHU. Effect of adhesive characteristic on static strength of adhesive-bonded aluminum alloys. *International Journal of Adhesion & Adhesives* [online]. 2014, **2015**(57), 10 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749614001973>
- [15] ČSN ISO 10365: Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje. ÚNMZ, 1995
- [16] Measurement Principles of DIC. *Dantecdynamic* [online]. Skovlunde, 2018 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/measurement-principles-of-dic/>
- [17] HUVAR, Filip. Měření deformace 3D tištěné prostorové struktury automobilového světloometu metodou DIC [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/128842>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [18] ŠTÁBL, Jakub. Mechanické vlastnosti vybraných dřev v tlaku měřené standardními zkouškami a optickou metodou na bázi metody korelace digitálního obrazu [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=42609;download_prace=1. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Václav Seber.
- [19] Digital Image Correlation (DIC). *Lavision* [online]. Göttingen, 2019 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://www.lavision.de/en/techniques/dic-dvc/>
- [20] FADIJI, Tobi, Corné J. COETZEE a Umezuruike Linus OPARA. Evaluating the displacement field of paperboard packages subjected to compression loading using digital image correlation (DIC). *Food and Bioproducts Processing* [online]. 2020(123), 11 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308520304430?via%3Dihub>
- [21] DAI, X., F. YANG, Z. CHEN, X. SHAO a X. HE. Strain field estimation based on digital image correlation and radial basis function. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, roč. 65, č.2
- [22] Wang, Y.H., Jiang, J.H., Wanintrudal, C., Du, C., Zhou, D., Smith, L.M. and Yang, L.X. (2010), WHOLE FIELD SHEET-METAL TENSILE TEST USING DIGITAL IMAGE

CORRELATION. *Experimental Techniques*, 34: 54-59. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2009.00483.x>

[23] Gorszczyk J., Malicki K., Zych T. Application of digital image correlation (DIC) method for road material testing. *Materials*. 2019;12:2349. doi: 10.3390/ma12152349 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6696109/>

[24] VOJÁČEK, Antonín. Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. <https://automatizace.hw.cz> [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>

[25] Non-Contacting Video Extensometer - AVE 2 from Instron. In: *AZOMaterials* [online]. 2019 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=6506#>

[26] SOUKUP, Karel. Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <file:///C:/Škola/VŠB/Ing/Diplomová%20práce/Bc.+Karel+SOUKUP+-+Měření+mechanických+vlastností+konstrukčních+materiálů+s+využitím+optických+metod+měření+deformace.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[27] Telecentric lenses tutorial: Basic information and working principles. *Opto-e.com* [online]. 2018 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/resources/telecentric-lenses-tutorial>

[28] Kouzlo telecentrických objektivů. *Průmyslové-kamery.cz* [online]. 11.1.2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prumyslove-kamery.cz/clanky-aaktuality/clanky?pg=441>

[29] Alunet: Hliníkové profily na míru. EN AW-5754 H114 (AlMg3 W19) [online]. Pardubice, 2020 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5754>

[30] LOCTITE® EA 9514: Původní název Hysol 9514. In: *Henkel-adhesives* [online]. 2014 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243%20NEW-EN?pid=EA%209514&format=MTR&subformat=HYS&language=CS&plant=WERCS>

[31] ČSN EN 1465: Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Praha: Český normalizační institut, 2009.